

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. Louis BESSON,

Sous-chef du Service physique et météorologique
de l'Observatoire de Montsouris.

1^{re} THÈSE. — SUR LA THÉORIE DES HALOS.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 18 février 1909, devant la Commission d'Examen.

MM. ED. BOUTY, *Président.*

HALLER,

MICHEL,

} *Examineurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1909

ÉRIE A, n° 599.
N° d'ORDRE :
1331

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. Louis BESSON,

Sous-chef du Service physique et météorologique
de l'Observatoire de Montsouris.

1^{re} THÈSE. — SUR LA THÉORIE DES HALOS.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 18 février 1909, devant la Commission d'Examen.



MM. ED. BOUTY, *Président.*

HALLER,

MICHEL,

} *Examineurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1909

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

	MM.	
Doyen.....	P. APPELL, Professeur	Mécanique rationnelle.
Doyen honoraire.....	G. DARBOUX.....	Géométrie supérieure.
Professeurs honoraires.	L. TROOST.	
	CH. WOLF.	
	J. RIBAN.	
	LIPPMANN.....	Physique.
	BOUTY.....	Physique.
	BOUSSINESQ.....	Physique mathématique et Calcul des probabilités.
	PICARD.....	Analyse supérieure et Algèbre sup.
	H. POINCARÉ.....	Astronomie mathématique et Mécanique céleste.
	Y. DELAGE.....	Zoologie, Anatomie, Physiol. compar.
	G. BONNIER.....	Botanique.
	DASTRE.....	Physiologie.
	KÖNIGS.....	Mécanique phys. et expérimentale.
	VÉLAIN.....	Géographie physique.
	GOURSAT.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	CHATIN.....	Histologie.
	PELLAT.....	Physique.
Professeurs	HALLER.....	Chimie organique.
	JOANNIS.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	JANET.....	Physique
	WALLERANT.....	Minéralogie.
	ANDOYER.....	Astronomie physique.
	PAINLEVÉ.....	Mathématiques générales.
	HAUG.....	Géologie.
	TANNERY.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	RAFFY.....	Applicat. de l'analyse à la Géométrie.
	HOUSSAY.....	Zoologie.
	C. CHABRIÉ.....	Chimie appliquée.
	H. LE CHATELIER.....	Chimie.
	G. BERTRAND.....	Chimie biologique.
	M ^{me} P. CURIE.....	Physique générale.
	CAULLERY.....	Zool. (Évolution des êtres organisés).
	N.....	Zoologie, Anatomie, Physiol. comp.
	N.....	Chimie.
	PUISEUX.....	Mécanique et astronomie.
	LEDUC.....	Physique.
	HADAMARD.....	Calcul différentiel et Calcul intégral
Professeurs adjoints ...	MATRUCHOT.....	Botanique.
	MICHEL.....	Minéralogie.
	BOUVEAULT.....	Chimie organique.
	BOREL.....	Théorie des fonctions.
	G. PRUVOT.....	Anatomie comparée.
Secrétaire	A. GUILLET.	

A MES PARENTS.

PREMIÈRE THÈSE.

SUR LA THÉORIE DES HALOS.

INTRODUCTION.

Définitions. — Le terme de *halo* s'applique spécialement au cercle coloré, d'environ 22° de rayon, qui se montre souvent autour du Soleil ou de la Lune.

Par extension, on réunit sous cette dénomination un ensemble très complexe de phénomènes optiques, en relation évidente avec le cercle de 22° qui les accompagne presque toujours.

De ce cercle, auquel ils sont tangents en haut et en bas, se détachent parfois deux arcs, symétriques par rapport au vertical solaire. Ce sont les *arcs tangents, inférieur et supérieur*, au halo de 22° . Leur forme varie avec la hauteur de l'astre éclairant. Quand celui-ci est à plus de 35° de l'horizon, ils se soudent de manière à constituer une courbe continue dont la forme se rapproche de celle de l'ellipse. C'est le *halo circonscrit*.

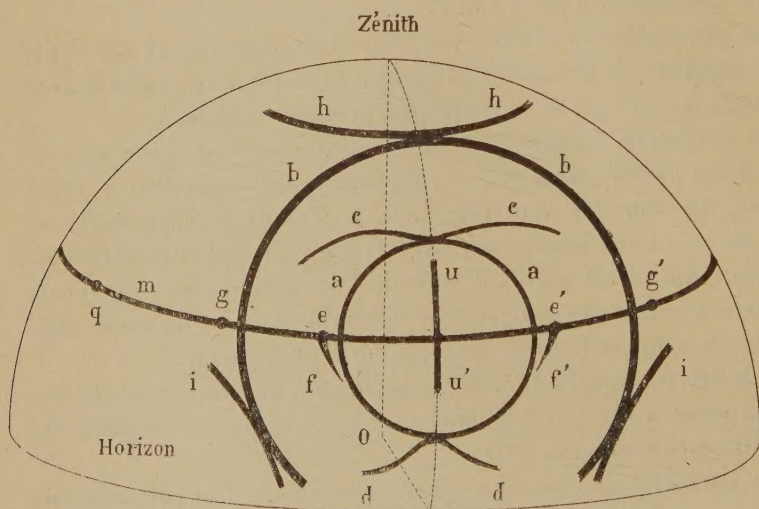
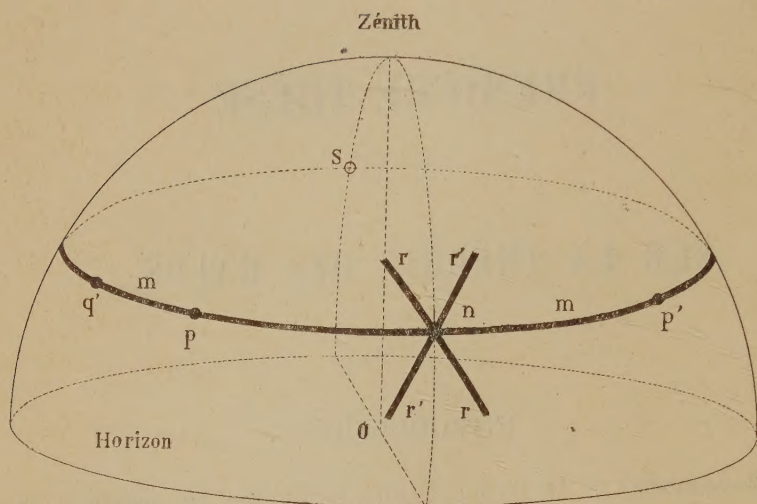
A droite et à gauche du Soleil, sur le halo ou un peu en dehors, apparaissent assez souvent deux taches lumineuses arrondies, les parhélies ordinaires de 22° .

Les parhélies peuvent être prolongés vers le bas par de petits arcs qui se dirigent obliquement vers le halo (arcs obliques de Lowitz).

On appelle *cercle parhélitique* un cercle blanc horizontal qui passe par le Soleil et par les parhélies.

Sur ce cercle peuvent se montrer divers nœuds de lumière :
1^o les *parhélies* de 46° , à environ 46° du Soleil; 2^o l'*anthélie*, à

Fig. 1.



O, position de l'observateur; S, soleil; *a*, halo de 22° ; *b*, halo de 46° ; *c*, arc tangent supérieur du halo de 22° ; *d*, arc tangent inférieur du halo de 22° ; *e*, *e'*, parhélies ordinaires de 22° ; *f*, *f'*, arcs de Lowitz; *g*, *g'*, parhélies de 46° ; *h*, arc circumzénithal; *i*, *i'*, arcs tangents infralatéraux; *m*, cercle parhélique; *n*, anthélie; *p*, *p'*, paranthélies ordinaires de 120° ; *q*, *q'*, paranthélies de 90° ; *r*, *r'*, arcs obliques de l'anthélie; *u*, *u'*, colonne lumineuse.

l'opposé de l'astre; 3° les *paranthélies ordinaires* de 120° qui constituent avec le Soleil trois points équidistants; 4° des *paranthélies extraordinaires* à environ 90° du Soleil; 5° d'autres paranthélies vus par quelques observateurs à des distances azimutales mal déterminées, mais qui paraissaient différentes de 90° et de 120° .

Le halo ordinaire est parfois entouré d'un cercle plus grand, centré comme lui sur le Soleil, le halo de 46° , qui a, lui aussi, des *arcs tangents inférieur et supérieur* : l'*arc circumzénithal* et l'*arc circumhorizontal*. Il est en outre touché latéralement par d'autres courbes lumineuses, les *arcs tangents infralatéraux*.

On peut voir exceptionnellement autour du Soleil d'autres cercles de diverses dimensions, les uns teintés des couleurs du prisme, les autres blancs.

Sur l'anthélie se croisent parfois des arcs blancs placés en sautoir, ce sont les *arcs obliques de l'anthélie*.

Aux halos se rattachent aussi les colonnes de lumière verticales qui se montrent assez souvent au-dessus ou au-dessous du Soleil ou de la Lune.

Quoique déjà longue, l'énumération qui précède est loin d'être complète. En dehors des phénomènes mentionnés, il en est une foule d'autres qui ont été notés deux ou trois fois, ou même une seule fois, mais par des observateurs dignes de confiance. La liste n'est sans doute pas près d'être close. Dans ces dernières années, on a vu plusieurs sortes de halos qui n'avaient jamais été signalées jusqu'alors, depuis trois siècles qu'on observe scientifiquement ces phénomènes. Il est donc probable que, parmi les formes si nombreuses et si variées qu'ils sont susceptibles de prendre, plus d'une nous est encore inconnue et que, longtemps encore, leur théorie restera nécessairement inachevée.

Aperçu historique sur la théorie des halos. — C'est au physicien français Mariotte qu'on doit l'hypothèse fondamentale qui sert de base à l'explication des halos. Dans son *Traité de la nature des couleurs*, publié en 1686, il les attribue à l'action de la lumière solaire ou lunaire sur des cristaux de glace flottant dans l'atmosphère, et il donne du halo et des parhélies ordinaires de 22° une théorie à laquelle on ne trouve presque rien à reprendre.

Selon lui, les cristaux de glace sont des prismes droits dont la section est un triangle équilatéral. Les deux phénomènes dont il s'agit de rendre compte sont dus à la réfraction de la lumière dans les angles dièdres de 60° . Si les prismes sont tournés indifféremment dans tous les sens, on a le cercle de 22° ; s'ils viennent au contraire à s'orienter verticalement, on a les parhélies.

La théorie de Mariotte ne rencontra pas la faveur qu'elle méritait. Pendant tout le XVIII^e siècle, on lui préféra celle d'Huygens ⁽¹⁾, qui substituait aux prismes de Mariotte des cylindres d'eau liquide à noyau de glace cylindrique.

En 1803, Thomas Young ⁽²⁾ tira de l'oubli et fit adopter définitivement l'hypothèse de Mariotte. Il montra que, convenablement développée, elle donne facilement l'explication non seulement du halo de 22° et des parhélies, mais encore de trois autres phénomènes : par la réflexion de la lumière sur les faces latérales des prismes verticaux qui produisent les parhélies, il rendit compte du cercle parhélifique. D'autre part, en admettant que les prismes peuvent, dans d'autres circonstances, se coucher horizontalement, il fit voir que la réfraction dans les angles dièdres de 60° donne alors naissance aux arcs tangents, supérieur et inférieur, du halo de 22° . Enfin, il attribua le halo de 46° à la réfraction dans les angles dièdres de 90° que forment, dans les prismes de glace, les faces latérales avec les bases. Cette dernière explication lui a, dit-il, été suggérée par Cavendish.

De 1814 à 1840, Venturi ⁽³⁾ en Italie, Brandes ⁽⁴⁾ et Galle ⁽⁵⁾ en Allemagne, publièrent sur les halos des travaux importants. Mais c'est Bravais qui fit accomplir à cette branche de l'Optique les progrès les plus considérables.

Son premier travail sur le sujet est la *Notice sur les parhélies*, qui parut en 1845 dans le *Journal de l'École Polytechnique*. Deux ans après il publie dans le même Recueil son célèbre *Mémoire sur les halos*, où il rassemble toutes les observations de halos connues et discute les théories proposées en les soumettant

⁽¹⁾ *Opuscula posthuma. Dissertatio de coronis et parheliis*, 1703.

⁽²⁾ *Journal of Nicholson*, t. VI.

⁽³⁾ *Commentarii sopra Ottica*. Bologne, 1814.

⁽⁴⁾ *Gehler's neues Wörterbuch*, art. Hof.

⁽⁵⁾ *Poggendorff's Annalen*, t. XLIX.

à l'épreuve de l'Analyse mathématique. Plusieurs d'entre elles n'avaient été formulées que d'une manière incomplète ou inexacte. Il les rectifie ou les précise. Dans d'autres cas, il en crée de nouvelles et, par une extension logique de la théorie, il parvient à donner une explication satisfaisante de presque tous les phénomènes observés.

L'*Annuaire météorologique de la France pour 1851* renferme un troisième Mémoire de Bravais sur le même sujet. C'est une *Notice sur les halos* conçue dans un esprit de vulgarisation et destinée surtout à guider les observateurs.

L'œuvre de Bravais était si complète, si bien coordonnée, si propre à satisfaire à la fois les analystes par ses développements mathématiques d'une rigueur inattaquable et les observateurs par le solide ensemble de faits sur lequel s'y trouve toujours appuyée la théorie, qu'elle fit immédiatement autorité, non seulement en France, mais à l'étranger, et qu'elle est demeurée presque intacte jusqu'à ces derniers temps.

Dans son *Traité d'Optique météorologique* (1) paru en 1906, Pernter a été le premier à s'éloigner des idées de Bravais, qu'il rejette sur nombre de points importants, notamment en ce qui concerne les trois sortes d'arcs tangents au halo de 46°.

Il me semble et j'espère même démontrer que la véritable explication de ces phénomènes est celle qu'a donnée Bravais. Par contre, il est d'autres parties de la théorie des halos qui demandent, selon moi, à être modifiées. Et d'abord, en quoi consiste exactement cette théorie?

L'hypothèse fondamentale de Mariotte peut être considérée à l'heure actuelle comme définitivement vérifiée. Les observations faites, soit sur les montagnes, soit dans les régions polaires, ont démontré que la présence de particules glacées au sein de l'air est une condition nécessaire de l'apparition des halos. On est donc conduit à attribuer ces phénomènes aux réflexions et aux réfractions que subit la lumière à la surface ou à l'intérieur des cristaux de glace atmosphériques.

Cela posé, l'explication d'une courbe lumineuse déterminée comporte trois questions bien distinctes :

(1) *Meteorologische Optik*, III. Abschnitt. Wien und Leipzig, 1906.

1° Imaginer un système optique susceptible de rendre compte de l'aspect et des diverses particularités du phénomène; toutes les fois qu'il ne s'agira pas d'un cercle centré sur l'astre éclairant, il sera nécessaire d'attribuer au système optique une certaine orientation dans l'espace;

2° Montrer qu'il existe un type de cristaux de glace dans lequel ce système optique se trouve réalisé;

3° Prouver que les cristaux de cette forme prennent effectivement dans l'atmosphère l'orientation exigée.

Or, nous verrons qu'on avait sur l'orientation des cristaux de glace des idées erronées et que, de ce fait, plusieurs des théories proposées sont inadmissibles.

Il est donc nécessaire d'établir les principes exacts qui règlent l'orientation des cristaux de glace et de mettre la théorie des halos en harmonie avec ces principes. C'est ce que j'essaierai de faire.

PREMIÈRE PARTIE.

RÉSUMÉ ET DISCUSSION DES RÉSULTATS DE DIX ANNÉES D'OBSERVATIONS.

Pour la théorie des halos, il est fort important de connaître le degré de fréquence de leurs divers aspects et comment il varie avec le lieu d'observation, la saison, l'heure, la hauteur du Soleil, etc.

D'une manière générale, c'est toujours par l'étude des variations des phénomènes qu'on parvient à la connaissance de leurs lois et de leur cause.

Dans le domaine de la Physique expérimentale, on produit et l'on fait varier à volonté les phénomènes. En Météorologie, au contraire, on ne peut ni les provoquer, ni les modifier, ni même, bien souvent, les prévoir. On doit se contenter de les observer quand ils se produisent et de noter comment ils varient d'eux-mêmes dans le temps et dans l'espace.

En ce qui concerne les halos, ces données sont d'une application particulièrement utile et directe.

La fréquence d'un phénomène étant nécessairement en rapport avec celle de la cause qui le produit, il devra exister un certain parallélisme entre la fréquence d'une forme de halo et celle du type de cristaux de glace qu'on considère comme lui donnant naissance.

Si plusieurs phénomènes sont dus aux mêmes cristaux, ils devront, pour une même hauteur de Soleil, accuser les mêmes variations de fréquence, en fonction de la saison par exemple.

D'autre part, les chances de voir une courbe lumineuse déterminée sont, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelles à la fraction de lumière transmise par chaque cristal producteur, et cette fraction varie en général avec la hauteur du Soleil. D'où l'importance de l'étude de la variation de fréquence avec la hauteur du Soleil, comme moyen de contrôler la théorie.

Nous verrons que la recherche de cette variation est inséparable de celle des variations diurne et annuelle.

CHAPITRE I.

Fréquence des diverses formes de halos.

L'observation des halos est assez délicate. Pour les noter avec quelque exactitude, il faut non seulement de l'attention, mais aussi une expérience assez longue à acquérir. Ils sont souvent peu marqués et, à l'exception du cercle de 22° , ils ne se montrent presque toujours que d'une manière fugitive. Toutefois un observateur exercé arrive à prévoir, sans trop se tromper, leur apparition et, moyennant une vigilance suffisante, n'en laisse échapper que bien peu.

Les observations sur lesquelles porte la présente statistique ont été faites à l'Observatoire de Montsouris, par M. Dutheil et par moi, du 1^{er} janvier 1898 au 31 décembre 1907, c'est-à-dire pendant dix années consécutives (1).

Comme nous n'avons pu porter aux halos une attention suffisamment soutenue qu'entre 7^h 30^m et 19^h 30^m, j'ai limité mes relevés statistiques à cet intervalle de temps et n'ai pas tenu compte des phénomènes occasionnellement observés avant ou après. J'ai aussi laissé de côté les halos lunaires.

Voici le nombre de jours durant lesquels s'est montrée chacune des formes de halo :

Halo de 22°	1317 jours, soit 1 jour sur	3
Parhélies ordinaires	307 »	12
Arc circumzénithal	111 »	33
Arcs tangents au halo de 22°	93 »	39
Halo de 46°	79 »	46
Sommet du halo de 22°	121 »	30
Sommet du halo de 46°	56 »	65
Colonnes verticales	18 »	203
Cercle parhélique.....	10 »	365
Arcs tangents infralatéraux	2 »	2000
Paranéliés de 120°	2 »	2000
Anthélie.....	1 »	4000
Parhélies de 46°	1 »	4000
Paranéliés extraordinaires.....	1 »	4000
Autres phénomènes.....	2 »	2000

(1) Le résumé de nos observations a été publié chaque année dans les *Annales de l'Observatoire de Montsouris*.

Il est intéressant de comparer ces résultats à ceux qu'ont obtenus les autres observateurs. La plupart, malheureusement, n'ont noté que les halos ordinaires et les parhélies de 22° . Quelques-uns ont fait mention des arcs tangents, mais en les confondant tous sous cette dénomination générale.

On ne connaît que trois séries d'observations détaillées et suffisamment prolongées pour avoir donné matière à une semblable statistique :

1° Celle d'Upsal, où des observations systématiques ont été faites pendant 7 ans, de 1866 à 1872, sous la direction de Rubenson ⁽¹⁾;

2° Celle du Parc Saint-Maur, dont les résultats n'ont été que partiellement publiés; Renou, directeur de l'Observatoire du Parc Saint-Maur de 1873 à 1902, a donné en 1890, dans une Note des *Comptes rendus* ⁽²⁾, la statistique du nombre de jours d'apparition des parhélies de 22° , de l'arc circumzénithal, du halo circonscrit, du halo de 46° et du cercle parbélique, au cours des 17 années météorologiques 1873-1889; le nombre de jours de halo ordinaire n'est pas indiqué, mais, d'après les chiffres donnés par M. Moureaux dans un travail plus récent ⁽³⁾, il a dû être peu différent de 1750 pour les 17 années considérées;

3° La série du réseau météorologique des Pays-Bas, qui comprend un grand nombre de stations où l'on observe les halos avec beaucoup de soin; Pernter ⁽⁴⁾ a fait, dans les publications de l'Institut royal météorologique des Pays-Bas, le relevé du nombre de jours où les diverses sortes de halos ont été aperçues durant les 10 années 1892-1901.

Afin de rendre les chiffres d'Upsal et du Parc Saint-Maur plus facilement comparables à ceux de Montsouris et du réseau des Pays-Bas, je les ai réduits à une période de 10 ans en multipliant les premiers par $\frac{10}{7}$ et les seconds par $\frac{10}{17}$. C'est ainsi qu'a été obtenu le Tableau ci-après :

(1) La statistique en a été calculée et publiée par Hellmann, dans la *Meteorologische Zeitschrift*, Band XXVIII, 1893, p. 415.

(2) *Comptes rendus*, t. CX, 1890, p. 851.

(3) *Annuaire de la Société météorologique de France*, 1905, p. 275.

(4) *Meteorologische Optik*, p. 274.

Nombre de jours d'apparition des diverses formes de halo en 10 années.

	Parc			
	Montsouris.	Saint-Maur.	Upsal.	Pays-Bas.
Halo de 22°.....	1317	1030	684	1689
Parhélies.....	307	63	233	423
Arcs tangents au halo de 22°.	93	18	101	113
Halo de 46°.....	79	15	31	38
Arcs tangents au halo de 46°.	111	46	3	67
Cercle parhélique.....	10	2	.	22
Colonnes lumineuses.....	18	.	106	43
Paranthélies.....	1	.	.	1
Parhélies de 46°.....	1	.	.	1

Il faut remarquer que, partout ailleurs qu'à Montsouris, on a compté tous les halos solaires observés, sans limitation d'heure, et que les halos lunaires ont été pris en considération dans les séries du Parc Saint-Maur et des Pays-Bas.

Certains phénomènes sont désavantagés dans notre statistique de Montsouris, du fait qu'on n'a tenu compte que des observations effectuées entre 7^h 30^m du matin et 7^h 30^m du soir. Cette remarque s'applique surtout aux colonnes lumineuses qui ne se montrent guère que vers le lever ou le coucher du Soleil et n'ont pu être notées le matin que durant une faible partie de l'année. Il en est de même, mais à un degré moindre, pour l'arc circumzénithal qui ne se voit que par hauteur de Soleil inférieure à 32°.

Enfin les observations d'un réseau de stations comme celui des Pays-Bas ne sont pas entièrement comparables à celles d'une station unique.

En tenant compte de ces diverses considérations, on reconnaîtra que les résultats des quatre séries sont assez concordants.

Après le halo de 22°, qui est, comme on le sait depuis longtemps, le phénomène le plus fréquent, toutes les quatre donnent la seconde place aux parhélies de 22° qui sont trois fois moins fréquents d'après Upsal, quatre fois d'après les Pays-Bas et Montsouris, seize fois (?) d'après le Parc Saint-Maur.

Les arcs tangents au halo de 22°, le halo de 46°, son arc tangent supérieur et les colonnes lumineuses forment, dans les quatre séries, un groupe de phénomènes beaucoup plus rares. D'après nos observations, les trois premiers ont des fréquences peu différentes, de douze à dix-sept fois plus petites que celle du

halo de 22° . Dans la série d'Upsal, l'arc circumzénithal paraît désavantagé au profit du halo de 46° . On peut se demander si ces deux phénomènes n'ont pas été quelquefois pris l'un pour l'autre. Souvent, au point où ils seraient tangents, on voit un arc court, de courbure indécise, qui pourrait être aussi bien le halo de 46° , l'arc circumzénithal ou même l'arc bitangent de Bravais. Le classement de ces apparitions avec l'une des courbes susdites serait purement arbitraire. Nous notons dans ce cas *sommet du halo de 46°* , et nous appelons de même *sommet du halo de 22°* les arcs courts qui se montrent quelquefois à 22° au-dessus ou au-dessous du Soleil sans présenter nettement la courbure des arcs tangents au halo ordinaire.

Le cercle parhélique occupe, dans les quatre séries, un rang intermédiaire entre le groupe de phénomènes dont il vient d'être question et les apparences extrêmement rares qui constituent un autre groupe bien distinct, comprenant l'anthélie, les paranthélies, les arcs tangents infralatéraux, etc. Ces phénomènes, vraiment singuliers, ne se montrent que de loin en loin. Malgré le nombre et l'attention des observateurs, on n'a pu voir en Hollande, de 1872 à 1901, ni les arcs infralatéraux, ni l'anthélie, qui sont pourtant parmi les moins rares du groupe. Renou a observé les halos pendant plus de 50 ans sans apercevoir une seule fois ni les parhélies de 46° , ni les arcs obliques de l'anthélie, ni les paranthélies de 90° , ni plusieurs autres phénomènes parfaitement connus et classés.

En résumé, les diverses formes de halos se rangent en plusieurs groupes caractérisés par des fréquences très différentes. Nous aurons à tenir compte de ce fait dans la théorie.

CHAPITRE II.

Variations de fréquence des halos suivant la nébulosité, l'heure, la saison et la hauteur du Soleil.

I. — HALO DE 22° .

Variation annuelle. — Pour étudier la variation annuelle de la fréquence du halo de 22° , on s'est borné presque toujours à

comparer les nombres de jours où le halo a été vu dans les différents mois. Ce procédé est peu propre à mettre en lumière la variation véritable de la cause du phénomène, car le nombre de jours de halo dans un mois de l'année est fonction de la longueur du jour et du degré de nébulosité. Toutes choses égales d'ailleurs, les chances de voir un halo sont d'autant plus grandes que le Soleil reste plus longtemps au-dessus de l'horizon et que les nuages inférieurs cachent moins souvent les nuées supérieures où les halos prennent naissance.

Fritsch à Prague ⁽¹⁾ et Neumayer à Melbourne ⁽²⁾ ont considéré, au lieu du nombre de jours, le nombre d'heures de visibilité. La variation annuelle ainsi obtenue est affectée des mêmes causes d'erreur.

Pour que nos résultats puissent être rapprochés de ceux qui ont été précédemment publiés, je donne ci-dessous le nombre de jours durant lesquels le halo de 22° a été vu à Montsouris, en distinguant trois cas, suivant que ce phénomène était brillant, d'intensité moyenne, ou enfin peu marqué. Dans ce dernier cas, on peut admettre qu'un observateur peu exercé ne l'aurait pas aperçu.

	Brillant.	Brillant ou moyen.	Brillant, moyen ou faible.
Janvier.....	3	43	64
Février.....	10	47	77
Mars.....	14	93	113
Avril.....	38	122	144
Mai.....	44	122	155
Juin.....	44	130	156
Juillet.....	15	77	98
Août.....	15	109	133
Septembre.....	19	95	118
Octobre.....	12	92	120
Novembre.....	5	44	70
Décembre.....	2	45	69
Totaux.....	221	1019	1317

Quel que soit le degré d'intensité auquel on limite la statistique, on trouve un maximum principal en juin, un minimum principal

⁽¹⁾ *Meteorolog. Zeitschrift*, II. Band, 1867, p. 465-470.

⁽²⁾ *Meteorolog. Zeitschrift*, 1901, p. 120.

en décembre ou janvier et un minimum secondaire en juillet.

Pour les halos brillants, il y a un maximum secondaire en septembre. Pour les halos brillants ou moyens et pour les halos en général, ce maximum est en août. Si l'on ne veut retenir que le trait le plus saillant de ces variations, on notera que d'avril à juin le nombre mensuel de jours de halo se tient fort au-dessus de sa valeur moyenne annuelle.

Cet accroissement du nombre des halos au printemps paraît être un fait à peu près général sur l'hémisphère Nord. Il ressort des premières observations suivies qui aient été faites, celles de Tycho-Brahé à Uraniborg, dans le Sund, de 1582 à 1597. On l'a constaté en Angleterre, en Suède, en Bohême, en Allemagne, en Russie, en Sibérie, au Japon, à New-York et sur tout l'océan Atlantique septentrional. Par contre, à Melbourne, dans l'hémisphère austral, c'est en novembre et décembre qu'on observe le plus grand nombre de halos (¹).

En ce qui concerne la région parisienne, les nombres mensuels de jours de halo ont été déjà donnés par M. Moureaux (²) d'après 30 années d'observations faites au Parc Saint-Maur. Il a compté le nombre de jours durant lesquels on y avait noté un phénomène de halo quelconque, lunaire ou solaire. Le ciel était observé toutes les heures, sauf entre 1^h et 4^h du matin. Malgré cela, dans la série du Parc Saint-Maur, le nombre moyen annuel de jours de halo n'est que de 92, tandis qu'à Montsouris on a compté par an en moyenne 109 jours de halo de 22° solaire, entre 7^h 30^m du matin et 7^h 30^m du soir.

Pour le Parc Saint-Maur, les nombres mensuels de jours de halo, rapportés à 10 années, sont les suivants :

Janv.	Févr.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
53	53	89	106	114	95	77	82	72	83	57	43

La courbe représentative est presque identique à celle de Montsouris. Elle présente, comme celle-ci, un minimum principal en hiver et un minimum secondaire en juillet. On y retrouve même

(¹) Voir le Mémoire de MESSERSCHMITT, *Meteor. Zeitschrift*, 1901, p. 120; celui de HELLMANN, *Meteor. Zeitschrift*, 1893, p. 415, et LEYST, *Die Halophanomena in Russland*, Moscou, 1903.

(²) *Annuaire de la Société météorologique de France*, 1905, p. 275.

un troisième minimum en septembre. Seulement le maximum principal y est en mai et non en juin et le maximum d'octobre y surpasse légèrement celui d'août.

Pour reconnaître comment varie réellement dans le cours de l'année la fréquence du halo de 22° , indépendamment des effets perturbateurs de la nébulosité et de la durée inégale des jours et des mois, j'emploierai la méthode qui m'a déjà servi pour les cirrus dans un travail antérieur ⁽¹⁾.

Tout d'abord, examinons de quelle manière la nébulosité influe sur la visibilité du halo.

Si l'on prend le rapport du nombre des halos vus par la nébulosité 0 au nombre total de nébulosités 0 et si l'on fait le même calcul pour les autres degrés de nébulosité : 1, 2, ..., 10, on obtient les résultats suivants :

	Nébulosité.										
	0.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Fréquence apparente du halo, en centièmes.....	15	16	13	18	16	14	13	11	9	7	7

Les nombres ci-dessus montrent que, vis-à-vis des halos, les nuages inférieurs ne jouent pas simplement le rôle d'écrans, sans quoi la fréquence apparente des halos diminuerait progressivement de la nébulosité 0 à la nébulosité 10. Or, nous voyons au contraire que cette fréquence apparente augmente d'abord et ne devient inférieure à ce qu'elle est par ciel clair qu'à partir de la nébulosité 5. On doit donc en conclure que la fréquence vraie du halo croît avec la nébulosité. J'étais déjà arrivé à la même conclusion pour les cirrus. Elle se vérifie aussi, comme on le verra, pour les arcs tangents.

Dans ce qui suit, je distinguerai seulement quatre degrés de nébulosité, correspondant, dans la notation ordinaire, à 0, 1-4, 5-8 et 9-10.

J'ai formé un premier Tableau du nombre de fois que le halo de 22° a été observé dans chaque mois, à chaque heure d'observation (9^h , 12^h , 15^h et 18^h) et par chaque nébulosité.

La méthode consiste à ramener ces nombres d'observations à ce

⁽¹⁾ *Variations diurne et annuelle de la fréquence des cirrus à Paris* (Annales de l'Observatoire municipal, t. VIII, année 1907, p. 411).

qu'ils auraient été si les mois avaient une durée uniforme de 30 jours et si la fréquence relative des divers degrés de nébulosité restait, à toute heure et dans tous les mois, constante et égale à sa valeur moyenne.

Dans mon travail sur les cirrus, on trouvera tous les éléments de cette réduction, qui s'opère par une simple règle de trois. J'ai formé un second Tableau des nombres ainsi réduits.

Pour étudier la variation annuelle je prends, pour chaque mois et chaque nébulosité, la moyenne des nombres réduits, relatifs à 9^h, midi et 15^h, laissant de côté l'observation de 18^h qui n'est pas représentée toute l'année.

J'obtiens de cette manière le Tableau suivant :

	Nébulosité.				
	0.	1-4.	5-8.	9-10.	Totaux.
Janvier.....	9	5	4	2	20
Février.....	10	7	5	4	26
Mars.....	11	14	7	3	35
Avril.....	18	15	5	10	48
Mai.....	16	9	7	6	38
Juin.....	14	9	7	7	37
Juillet.....	5	8	5	3	21
Août.....	8	8	5	3	24
Septembre.....	9	8	6	5	28
Octobre.....	15	9	4	6	34
Novembre.....	7	7	4	4	22
Décembre.....	12	6	6	3	27

Les quatre variations annuelles correspondant aux quatre degrés de nébulosité ont naturellement une amplitude d'autant plus petite que la nébulosité considérée est plus forte, mais leur forme est sensiblement la même. Les faibles discordances qu'elles présentent peuvent être dues à l'insuffisance du nombre des observations.

L'addition des quatre nombres pour chaque mois tend à effacer les erreurs accidentelles dont ils sont individuellement affectés et fournit une variation résultante qu'on peut considérer comme la représentation, à une échelle indéterminée, de la variation annuelle de la cause même des halos.

Sa forme est remarquable (voir *fig. 2*). Elle se compose de deux ondes à peu près semblables, mais d'amplitudes inégales,

exactement à six mois d'intervalle. La plus grande est à son maximum en avril et l'autre en octobre. Les minima tombent en juillet et en janvier. Deux inflexions secondaires, en mai et en novembre, sont également séparées par un intervalle de six mois.

Variation diurne. — Je prends, pour chaque heure et chaque nébulosité, la moyenne des nombres réduits, d'une part pour les 6 mois d'octobre à mars et d'autre part pour les 6 autres mois. Les résultats sont les suivants :

<i>Semestre d'hiver.</i>						<i>Semestre d'été.</i>					
Heure.	Nébulosité.					0.	Nébulosité.				Totaux.
	0.	1-4.	5-8.	9-10.	Totaux.		1-4.	5-8.	9-10.	Totaux.	
9.....	11	6	4	4	25	12	8	7	6	33	
12.....	11	9	6	4	30	14	9	5	5	33	
15.....	9	8	6	4	27	10	11	5	6	32	
18.....	.	.	.	.	.	9	4	4	2	19	

La variation diurne est, comme on le voit, beaucoup moins marquée que la variation annuelle. Elle présente un maximum à midi dans les deux saisons. En été, la fréquence relative du halo, presque constante de 9^h à 15^h, diminue rapidement à la fin de l'après-midi.

II. — RAPPORT DU NOMBRE DES CAS DE HALO DE 22° AU NOMBRE DES CAS DE CIRRUS.

Le halo de 22° se montre presque toujours dans des cirrus ou dans des cirro-stratus. Il est donc intéressant de comparer sa fréquence à celle de ces nuages.

En divisant, pour chaque nébulosité et successivement pour chaque mois, puis pour chaque heure, le nombre des cas de halo par le nombre des cas de cirrus, j'ai obtenu la variation annuelle et la variation diurne du rapport considéré.

Les colonnes intitulées Totaux indiquent, pour chaque mois et chaque heure, la valeur moyenne de ce rapport. Elles ont été cal-

culées au moyen des totaux mensuels ou horaires des nombres de halos et de cirrus corrigés de la nébulosité.

	Nébulosité.				
	0.	1-4.	5-8.	9-10.	Totaux.
Janvier.....	0,32	0,19	0,17	0,20	0,22
Février.....	0,29	0,34	0,21	0,35	0,30
Mars.....	0,35	0,47	0,37	0,25	0,36
Avril.....	0,51	0,53	0,32	0,57	0,48
Mai.....	0,44	0,41	0,39	0,48	0,43
Juin.....	0,37	0,37	0,33	0,49	0,39
Juillet.....	0,22	0,37	0,28	0,29	0,29
Août.....	0,25	0,31	0,23	0,22	0,25
Septembre.....	0,26	0,30	0,37	0,29	0,30
Octobre.....	0,37	0,38	0,16	0,36	0,32
Novembre.....	0,25	0,29	0,22	0,26	0,25
Décembre.....	0,31	0,20	0,35	0,24	0,27
Moyennes.....	0,33	0,35	0,28	0,33	0,32

*Semestre d'hiver.**Semestre d'été.*

Heure.	Nébulosité.					Nébulosité.				
	0.	1-4.	5-8.	9-10.	Totaux.	0.	1-4.	5-8.	9-10.	Totaux.
9....	0,34	0,26	0,19	0,28	0,27	0,35	0,40	0,40	0,38	0,37
12....	0,32	0,38	0,27	0,31	0,32	0,35	0,34	0,30	0,39	0,34
15....	0,29	0,33	0,25	0,26	0,29	0,28	0,40	0,28	0,48	0,35
18....	.	.	.	.	.	0,21	0,15	0,19	0,11	0,18

Les résultats ci-dessus montrent que les nuages glacés sont loin d'être en toute saison également propres à donner le halo.

Le rapport qui mesure cette propriété offre un maximum très accentué en avril, et un autre beaucoup plus faible en octobre. Il présente des minima en janvier et en août.

HALO DE 22°.

	IX.	XII.	XV.	XVIII.	Totaux.	Nombre de jours.
Janvier.....	17	28	37	1	83	64
Février.....	29	38	33	5	105	77
Mars.....	51	48	58	23	180	113
Avril.....	73	79	68	41	261	144
Mai.....	70	68	62	58	258	155
Juin.....	70	67	60	57	254	156
Juillet.....	37	44	41	31	153	98
Août.....	54	53	46	44	197	133
Septembre...	44	58	51	29	182	118
Octobre.....	52	67	66	5	190	120
Novembre...	29	41	23	.	93	70
Décembre...	29	36	25	.	90	69
Année....	555	627	570	294	2046	1317

ARCS TANGENTS DU HALO DE 22°.

	IX.	XII.	XV.	XVIII.	Totaux.	Nombre de jours.
Janvier.....	1	2	1	.	4	4
Février.....	4	1	.	.	5	5
Mars.....	1	7	2	.	10	9
Avril.....	11	9	4	1	25	20
Mai.....	6	3	5	1	15	14
Juin.....	7	.	3	.	10	10
Juillet.....	6	.	.	1	7	7
Août.....	1	.	.	.	1	1
Septembre...	3	8	1	.	12	9
Octobre.....	1	6	6	.	13	10
Novembre...	.	1	.	.	1	1
Décembre...	1	2	1	.	4	3
Année....	42	39	23	3	107	93

PARHÉLIES DE 22°.

	IX.	XII.	XV.	XVIII.	Totaux.	Nombre de jours.
Janvier.....	6	9	11	.	26	21
Février.....	10	6	13	.	29	26
Mars.....	10	2	16	11	39	34
Avril.....	9	3	5	26	43	39
Mai.....	1	.	4	34	39	36
Juin.....	2	.	.	33	35	35
Juillet.....	1	.	.	27	28	28
Août.....	2	.	1	24	27	27
Septembre...	3	.	7	6	16	14
Octobre.....	6	4	13	3	26	22
Novembre...	3	3	6	.	12	10
Décembre...	4	8	4	.	16	15
Année....	57	35	80	164	336	307

ARC CIRCUMZÉNITHAL.

	IX.	XII.	XV.	XVIII.	Totaux.	Nombre de jours.
Janvier.....	4	10	.	.	14	14
Février.....	3	4	6	.	13	13
Mars.....	3	.	10	1	14	12
Avril.....	2	.	4	4	10	10
Mai.....	.	.	.	10	10	10
Juin.....	.	.	.	14	14	14
Juillet.....	.	.	.	5	5	5
Août.....	.	.	.	7	7	7
Septembre...	1	.	3	1	5	5
Octobre.....	3	1	8	.	12	11
Novembre...	1	2	.	.	3	3
Décembre...	.	6	1	.	7	7
Année....	17	23	32	42	114	111

HALO DE 46°.

SOMMET DU HALO DE 46°.

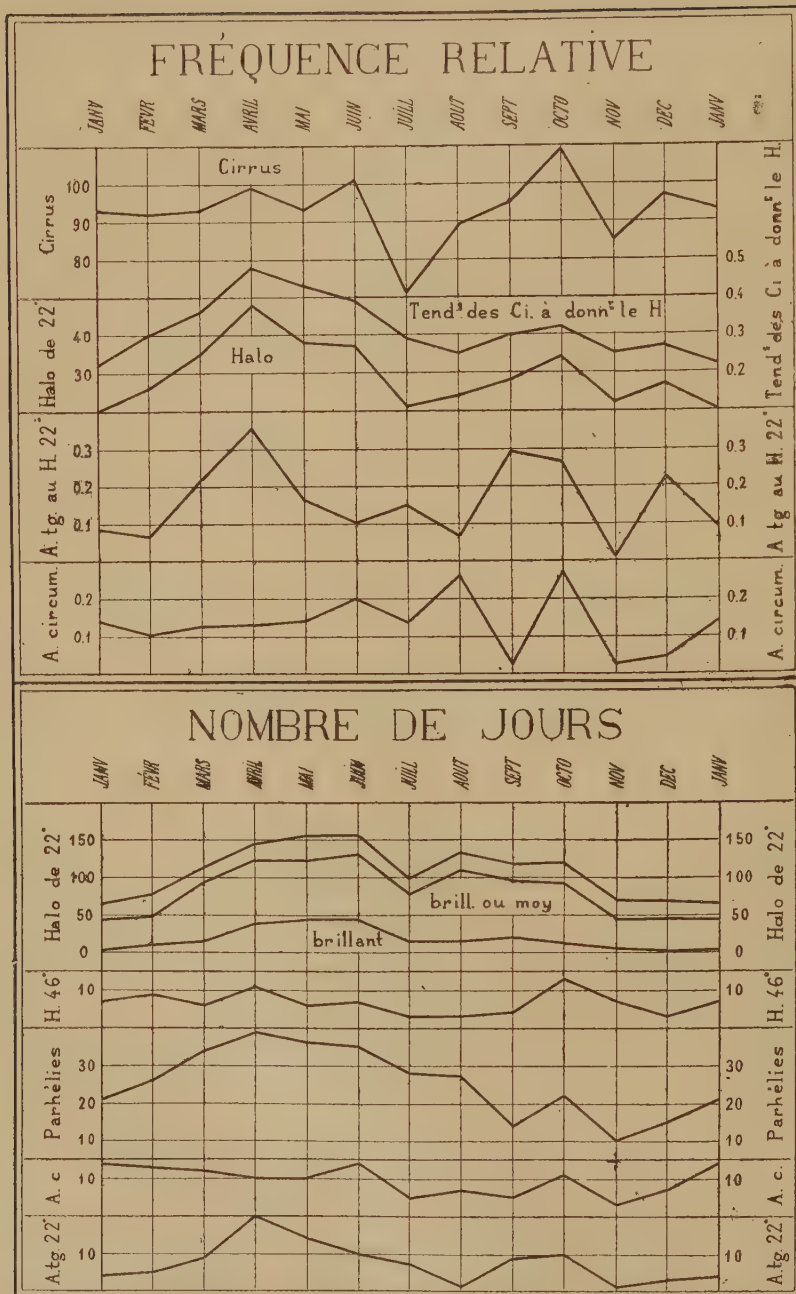
	Nombre de jours.						Nombre de jours.					
	IX.	XII.	XV.	XVIII.	Totaux.		IX.	XII.	XV.	XVIII.	Totaux.	
Janvier.....	2	5	.	.	7	7	.	5	1	.	6	6
Février.....	1	3	5	.	9	9	2	1	3	.	6	6
Mars.....	.	.	5	1	6	6	1	.	7	.	8	8
Avril.....	1	1	3	6	11	11	2	.	.	2	4	4
Mai.....	1	.	3	4	8	6	.	.	.	6	6	6
Juin.....	1	1	1	4	7	7	.	.	.	3	3	3
Juillet.....	1	.	.	2	3	3	.	.	.	1	1	1
Août.....	.	.	.	3	3	3	.	.	1	4	5	4
Septembre...	1	.	2	1	4	4	2	.	4	.	6	6
Octobre.....	2	3	9	.	14	13	2	.	3	.	5	5
Novembre...	3	1	3	.	7	7	1	4	.	.	5	5
Décembre...	.	3	.	.	3	3	.	2	.	.	2	2
Année....	13	17	31	21	82	79	10	12	19	16	57	56

SOMMET DU HALO DE 22°.

CERCLE PARHÉLIQUE.

	Nombre de jours.						Nombre de jours.					
	IX.	XII.	XV.	XVIII.	Totaux.		IX.	XII.	XV.	XVIII.	Totaux.	
Janvier.....	3	2	5	.	10	9	.	.	.	.	.	.
Février.....	3	2	5	.	10	10	.	.	.	.	.	.
Mars.....	4	1	.	.	5	5	.	.	2	.	2	2
Avril.....	2	1	3	9	15	14	1	3	.	1	5	4
Mai.....	2	.	3	9	14	13	1	.	.	.	1	1
Juin.....	.	1	.	16	17	17	1	.	.	.	1	1
Juillet.....	.	1	1	6	8	7	2	.	.	.	2	2
Août.....	2	.	1	3	6	6	.	.	.	.	.	.
Septembre...	4	2	2	1	9	9	.	.	.	.	.	.
Octobre.....	6	2	9	.	17	16	.	.	.	.	.	.
Novembre...	4	2	3	.	9	9	.	.	.	.	.	.
Décembre...	5	.	1	.	6	6	.	.	.	.	.	.
Année....	35	14	33	44	126	121	5	3	2	1	11	10

Fig. 2.



La comparaison des trois courbes annuelles relatives aux cirrus, aux halos de 22° et au rapport des halos aux cirrus (voir *fig. 2*) conduit à diverses remarques intéressantes. Elle fait voir, en particulier, que les variations de la fréquence du halo dans le cours de l'année dépendent beaucoup moins de la fréquence des cirrus que de leur tendance plus ou moins grande à donner le halo.

En ce qui concerne la variation diurne du rapport des halos aux cirrus, son trait le plus marqué est une diminution très rapide à la fin de l'après-midi en été. Chose curieuse, cette diminution coïncide avec un accroissement très accentué aussi de la fréquence des cirrus. Dans ce cas encore, la nature des cirrus exerce, sur la fréquence des halos, une influence prédominante.

III. — HALOS EXTRAORDINAIRES.

Je donne, pages 18 et 19, pour les principaux phénomènes de halo, la statistique des cas observés dans chaque mois et chaque partie de la journée. Les indications IX, XII, etc. désignent dans ces Tableaux les intervalles de temps compris entre $7^h 30^m$ et $10^h 30^m$, $10^h 30^m$ et $13^h 30^m$, etc.

Renou ⁽¹⁾ a cru démontrer, en 1890, que la distribution inégale des halos extraordinaires (parhélies, arcs tangents, etc.) dans le cours de l'année était attribuable simplement aux variations de la nébulosité.

Ayant compté le nombre de jours pendant lesquels il avait observé au moins un de ces phénomènes dans chaque mois durant dix-sept années, il en a trouvé 4 en décembre et 8 en juillet. Puis, considérant seulement l'arc circumzénithal, il a calculé le nombre d'heures pendant lesquelles ce phénomène peut se montrer, d'une part en décembre, d'autre part en juillet. « Le rapport, dit-il, me donne une fraction que je multiplie par le rapport inverse des nébulosités pendant les heures efficaces. Cela m'a donné à fort peu près le rapport de 1 à 2. Les circonstances atmosphériques qui produisent les halos sont donc les mêmes dans les deux saisons opposées. »

(¹) *Comptes rendus*, t. CX, 1890, p. 851.

On verra que cette conclusion est aussi inexacte pour les halos extraordinaires que pour le halo de 22° . D'ailleurs le raisonnement par lequel Renou y a été conduit n'est pas admissible. En multipliant le rapport des fréquences apparentes par le rapport inverse des nébulosités, il n'élimine pas l'action de la nébulosité, car la fréquence apparente des halos est bien loin d'être inversement proportionnelle au degré de nébulosité. Je l'ai déjà établi pour le halo de 22° ; les chiffres suivants montrent qu'il en est de même pour l'arc circumzénithal :

	Nébulosité.			
	0.	1-4.	5-8.	9-10.
Visibilité de l'arc circumzénithal (1) ..	6	11	5	1

Je me propose maintenant de déterminer, pour les arcs tangents au halo de 22° et pour l'arc circumzénithal, comment varie réellement la fréquence du phénomène suivant l'époque de l'année, l'heure et la hauteur du Soleil.

Arcs tangents au halo de 22° .

La fréquence apparente de ces arcs peut être considérée comme une fonction de la nébulosité, du mois, de l'heure, de la hauteur du Soleil et aussi du temps pendant lequel le Soleil reste à la hauteur considérée.

Comme précédemment, je distinguerai seulement quatre degrés de nébulosité et je partagerai la journée en quatre intervalles. Quant aux hauteurs du Soleil, je les classerai en quatre groupes : de 0° à 14° , de 15° à 29° , de 30° à 44° et de 45° à 59° .

Je considérerai, non plus les *cas* d'arcs tangents, mais les *durées de visibilité* dans chaque mois, à chaque heure et pour chaque hauteur de Soleil, évaluées en demi-minutes.

Je corrige d'abord les durées constatées des variations de la nébulosité en les ramenant à ce qu'elles auraient été, à chaque heure et dans chaque mois, si la fréquence relative des divers

(1) Durée totale en heures, corrigée de la répartition inégale des nébulosités aux différentes heures et dans les différents mois, des trois variations étudiées plus loin (p. 27) et de la durée inégale de présence du Soleil aux diverses hauteurs.

degrés de nébulosité était restée, à toute heure et dans tous les mois, constante et égale à sa valeur moyenne.

C'est la méthode employée déjà pour le halo de 22° ; mais, pour février et pour les mois de 31 jours, les coefficients de correction ne sont pas ici les mêmes, car, dans le cas actuel, on n'a pas à corriger les nombres observés de l'inégalité des mois.

Le Tableau suivant donne, pour chaque mois et chaque hauteur solaire, la durée de visibilité des arcs tangents corrigée des variations de la nébulosité et la durée de présence du Soleil en heures, entre $7^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ et $16^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ (¹) :

TABLEAU A.

	Durée de visibilité des arcs tangents au halo, corrigée de la nébulosité.				Durée de présence du Soleil.			
	$0^{\circ}\text{--}14^{\circ}$.	$15^{\circ}\text{--}29^{\circ}$.	$30^{\circ}\text{--}44^{\circ}$.	$45^{\circ}\text{--}59^{\circ}$.	$0^{\circ}\text{--}14^{\circ}$.	$15^{\circ}\text{--}29^{\circ}$.	$30^{\circ}\text{--}44^{\circ}$.	$45^{\circ}\text{--}59^{\circ}$.
Janvier.....	58	6	.	.	1288	1347	.	.
Février.....	0	94	0	.	684	1619	222	.
Mars.....	0	122	634	0	145	1094	1530	21
Avril.....	.	82	365	924	.	482	1121	1097
Mai.....	.	53	220	272	.	72	959	1449
Juin.....	.	.	97	208	.	.	781	1097
Juillet.....	.	0	236	273	.	15	886	1253
Août.....	.	0	25	3	.	295	1052	1443
Septembre..	32	198	488	38	23	839	1513	325
Octobre....	72	97	472	.	488	1546	757	.
Novembre...	0	12	.	.	1087	1536	.	.
Décembre...	39	239	.	.	1451	1068	.	.

Dans les sept mois de septembre à mars, les hauteurs de Soleil $0^{\circ}\text{--}14^{\circ}$ et $15^{\circ}\text{--}29^{\circ}$ sont toutes deux représentées. Si l'on fait pour cette période et pour l'une et l'autre hauteur la somme des durées de visibilité des arcs tangents, puis la somme des durées de présence du Soleil, et si l'on en prend le rapport, on obtient pour $0^{\circ}\text{--}14^{\circ}$, 0,039, et pour $15^{\circ}\text{--}29^{\circ}$, 0,085.

(¹) Pour obtenir ces durées, j'ai construit un graphique donnant la hauteur vraie du Soleil chaque jour et à chaque instant. Les courbes d'égale hauteur y sont tracées de degré en degré. L'échelle est de 1^{mm} pour 1 jour en abscisses, et de 1^{mm} pour 2 minutes de temps en ordonnées. Les calculs ont été faits d'après la *Connaissance des Temps* de 1901, année choisie comme représentant le mieux les conditions moyennes de la période 1898-1907.

De même, les huit mois février-mai et juillet-octobre donnent pour 15° - 29° , 0,108, et pour 30° - 44° , 0,303.

Enfin la période de mars à septembre donne pour 30° - 44° , 0,263, et pour 45° - 59° , 0,257.

Je rends la première et la troisième paire de rapports comparables à la deuxième en leur substituant les valeurs proportionnelles

$$\frac{0,039 \times 0,108}{0,085} \quad \text{et} \quad 0,108, \quad 0,303 \quad \text{et} \quad \frac{0,257 \times 0,303}{0,263}.$$

La variation de fréquence des arcs tangents en fonction de la hauteur solaire pourra donc être représentée par les nombres suivants :

	Hauteur du Soleil.			
	0°-14°.	15°-29°.	30°-44°.	45°-59°.
Fréquence relative des arcs	50	108	303	296

La moyenne de ces quatre nombres est 189. En la divisant par chacun d'eux j'obtiens des coefficients propres à corriger de la variation avec la hauteur solaire les durées de visibilité des arcs.

Je multiplie les nombres du Tableau A par ces coefficients, puis je fais pour chaque mois la somme des produits et enfin je divise par la durée de présence du Soleil. J'obtiens ainsi la variation annuelle :

Fréquence relative des arcs.

Janv.	Févr.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
87	65	218	356	163	103	149	65	294	264	8	224

La fréquence des arcs tangents au halo de 22° varie dans le cours de l'année à peu près comme celle du halo, mais le maximum d'automne arrive un peu plus tôt et a plus d'importance pour les arcs tangents que pour le halo (voir *fig.* 2).

Je groupe maintenant par mois et par heures les durées de visibilité des arcs tangents corrigées de la nébulosité et de la variation avec la hauteur solaire. Calculant en outre les durées de présence du Soleil à chaque heure dans chaque mois, je forme le Tableau suivant

TABLEAU B.

	Durée de visibilité des arcs tangents corrigée de la nébulosité et de la variation avec la hauteur solaire.				Durée de présence du Soleil.			
	IX.	XII.	XV.	XVIII.	IX.	XII.	XV.	XVIII.
Janvier.....	80	10	140	0	813	930	892	20
Février.....	140	24	0	0	839	843	843	205
Mars.....	9	311	287	0	929	930	931	466
Avril.....	248	551	161	131	900	900	900	681
Mai.....	143	40	220	4	929	621	930	901
Juin.....	156	0	37	0	900	78	900	901
Juillet.....	321	0	0	132	930	294	930	930
Août.....	18	0	0	0	930	930	930	818
Septembre...	73	233	489	0	900	900	900	490
Octobre.....	57	308	372	0	930	930	931	182
Novembre....	0	21	0	0	897	900	826	2
Décembre....	102	416	46	.	817	930	772	.

Je fais pour chaque heure la somme des durées de visibilité des arcs et la somme des durées de présence du Soleil : 1° d'avril à septembre; 2° d'octobre à mars. Je prends le rapport et j'obtiens la variation diurne dans la saison chaude et dans la saison froide :

		Heure.			
		IX.	XII.	XV.	XVIII.
Fréquence relative des arcs.	Avril-sept.....	175	221	165	56
	Oct.-mars.....	74	199	163	0

Comme pour le halo, la fréquence est maximum à midi dans les deux saisons et diminue rapidement à la fin de l'après-midi en été.

De 9^h à 15^h elle varie en moyenne assez peu pour que l'on n'ait pas à craindre de ce fait une erreur notable sur la variation annuelle et sur la variation avec la hauteur; mais il est évident que celles-ci auraient été altérées si j'avais tenu compte, pour les calculer, de l'observation de 18^h, dont l'adjonction aurait abaissé les chiffres relatifs aux mois d'été.

Arc circumzénithal.

Ce phénomène n'a été observé que par hauteur de Soleil comprise entre 5° et 29°; je diviserai cet intervalle en cinq parties de 5° chacune.

Après avoir, comme ci-dessus, corrigé des variations de la nébulosité les durées de visibilité exprimées en demi-minutes, je fais le total pour chaque mois et chaque hauteur solaire et je calcule les durées de présence du Soleil correspondantes :

TABLEAU A.

	Durée de visibilité de l'arc corrigée de la nébulosité.					Durée de présence du Soleil.				
	5°-9°.	10°-14°.	15°-19°.	20°-24°.	25°-29°.	5°-9°.	10°-14°.	15°-19°.	20°-24°.	25°-29°.
Janvier.....	0	55	81	196	.	433	529	900	447	.
Février.....	0	0	48	149	138	318	358	412	589	618
Mars.....	2	0	40	66	93	175	257	334	368	425
Avril.....	0	11	15	59	78	153	154	161	236	316
Mai.....	0	23	66	50	0	168	164	156	160	180
Juin.....	0	23	91	66	22	169	165	160	156	150
Juillet.....	0	18	69	47	7	171	166	161	159	171
Août.....	28	34	25	17	0	156	162	157	187	299
Septembre....	0	0	41	6	0	150	159	226	323	357
Octobre.....	18	116	111	115	170	204	319	396	467	683
Novembre....	0	0	27	57	6	390	454	636	756	144
Décembre....	0	18	120	.	.	467	612	1068	.	.

Si, pour la période de dix mois qui va de février à novembre et durant laquelle toutes les hauteurs sont représentées, on prend le rapport de la durée totale de visibilité de l'arc à la durée totale de présence du Soleil et cela pour chaque hauteur solaire, on a une première approximation de la variation avec la hauteur du Soleil :

	Hauteur du Soleil.				
	5°-9°.	10°-14°.	15°-19°.	20°-24°.	25°-29°.
Fréquence relative de l'arc (1 ^{re} appr.).	23	95	190	186	154

En divisant la moyenne de ces cinq nombres par chacun d'eux, j'obtiens des coefficients au moyen desquels je corrige de la variation avec la hauteur solaire les durées de visibilité. Cela fait, je groupe celles-ci par mois et par heure. Pour la période d'octobre à février, durant laquelle 9^h, 12^h et 15^h sont constamment représentées, je prends pour chacune de ces heures le rapport de la durée totale de visibilité de l'arc à la durée totale de présence du Soleil et j'obtiens les nombres suivants : pour 9^h, 0,077; pour 12^h, 0,132 et pour 15^h, 0,130. Les sept mois de février à mai et d'août à

octobre me donnent d'autre part : pour 9^h , 0,085 ; pour 15^h , 0,193 et pour 18^h , 0,145. En combinant le mieux possible ces deux groupes de déterminations, j'obtiens la variation diurne suivante :

	Heure.			
	IX.	XII.	XV.	XVIII.
Fréquence relative de l'arc.....	84	154	162	132

On ne retrouve pas ici la forte diminution de fréquence qu'accusaient à 18^h le halo et ses arcs tangents.

Après avoir corrigé de cette variation, toujours par le même procédé, les durées de visibilité déjà corrigées de la nébulosité et de la variation avec la hauteur solaire, je prends pour chaque mois le quotient de la durée totale de visibilité par la durée totale de présence du Soleil, ce qui me donne la variation annuelle :

	Janv.	Févr.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Fréquence relative de l'arc (1 ^{re} appr.)....	136	107	129	133	135	200	134	242	25	263	28	42

La variation de fréquence de l'arc circumzénithal en fonction de la hauteur du Soleil offrant pour la théorie une grande importance, j'ai cherché à en obtenir une approximation meilleure que la précédente en corrigeant de la variation diurne les nombres du Tableau A. Les résultats sont les suivants :

	Hauteur du Soleil.				
	5°-9°.	10°-14°.	15°-19°.	20°-24°.	25°-29°.
Fréquence relative de l'arc (2 ^e appr.)...	22	86	194	204	160

Enfin, à l'aide des nouveaux coefficients qui en résultent, j'ai calculé une deuxième approximation de la variation annuelle :

	Janv.	Févr.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Fréquence relative de l'arc (2 ^e appr.)....	140	103	126	131	139	201	137	261	24	271	27	44

La variation annuelle de l'arc circumzénithal est, on le voit, toute différente de celle des arcs tangents au halo de 22° . Il n'y a pas de maximum au printemps. De janvier à juillet, la fréquence reste presque constante; elle augmente fortement en août et octobre et passe par des maxima en septembre et novembre.

Il est à noter qu'on trouve un minimum en novembre, à la fois pour les cirrus, pour la tendance de ces nuages à donner le halo, pour le halo de 22° , pour ses arcs tangents et pour l'arc circumzénithal (voir *fig. 2*).

CHAPITRE III.

Mesures angulaires sur les halos.

Instruments et méthodes employés. — Nous nous sommes servis au début d'un petit théodolite dont la lunette avait été privée de ses lentilles, ce qui est indispensable.

À partir d'avril 1907, nous avons eu à notre disposition un autre théodolite, construit sur mes indications, spécialement en vue de l'observation des halos.

Les visées se font à l'aide d'une croisée de fils et d'une pointe d'aiguille espacées de 50^{cm} . L'aiguille est dans le prolongement de l'axe horizontal du théodolite. La croisée de fils est formée de deux fils de laiton fins, dont l'un est dans un plan vertical. Ces fils sont fixés sur un anneau de 27^{cm} de diamètre intérieur et de $0^{\text{cm}},5$ de largeur, porté lui-même par une tige solidaire de l'axe horizontal du théodolite et équilibré par un contrepoids à l'extrémité de la tige.

Pour les visées sur les halos, il importe que les organes formant la ligne de mire et leurs supports laissent aussi libre que possible la vue du ciel autour de la leur visée, car bien souvent celle-ci ne peut être perçue que par un effet de contraste. Dans la construction du théodolite dont il s'agit, on s'est efforcé de réaliser cette condition. L'anneau qui porte la croisée de fils est muni sur son pourtour intérieur de 36 petites pointes qui forment une graduation de 10° en 10° et sont destinés à apprécier occasionnellement l'inclinaison des arcs lumineux.

Le cône ayant pour sommet la pointe de l'aiguille et pour directrice la circonférence intérieure de l'anneau a une ouverture de 20° exactement. Les cercles du théodolite sont divisés en demi-degrés et munis de verniers donnant la minute.

Le théodolite est utile pour la détermination simultanée des deux

coordonnées d'un point ou lorsqu'il s'agit de vérifier l'horizontalité d'une courbe lumineuse, mais son emploi est incommode. Durant le temps nécessaire pour l'installer sur son trépied et le régler, bien souvent le phénomène qu'on se proposait d'observer disparaît.

Ce qu'on est appelé à mesurer dans les halos, c'est presque toujours soit l'azimut d'un point qui est à la même hauteur que le Soleil, soit une hauteur dans le vertical solaire.

Dans le premier cas, nous nous sommes fréquemment servis de la herse néphoscopique (¹). Nous nous plaçons de manière à voir le point visé exactement derrière l'axe vertical de la herse, puis, sans changer de place, nous amenons la ligne des pointes à se confondre en perspective avec cet axe. Il ne reste plus qu'à aller lire l'azimut sur le cercle divisé où les traits sont espacés de 5° en 5° . On apprécie le demi-degré avec une erreur qui peut atteindre facilement cette valeur. La précision de la mesure est d'ailleurs d'autant plus grande que l'œil est plus loin de la herse, c'est-à-dire que la hauteur angulaire du point visé est plus petite.

Pour les mesures de hauteur, nous avons fait, le plus souvent, usage du niveau à mercure que j'ai décrit en 1905 (²).

Il est constitué par un tube de verre quatre fois recourbé à angle droit en figure de rectangle et dont les extrémités sont soudées ensemble. On y a enfermé une colonne de mercure un peu plus longue que le côté inférieur du rectangle. Si l'on vise un point du ciel à l'aide de deux repères déterminant une ligne parallèle à ce côté, on verra le mercure monter plus ou moins haut dans le tube latéral voisin de l'œil et, si ce tube est convenablement gradué, on pourra connaître ainsi la hauteur angulaire du point visé.

Pour n'avoir pas à regarder trop obliquement, on se sert de deux couples de repères; les premiers, vers le bas de l'instrument, sont utilisés pour les hauteurs inférieures à 45° et les autres, vers le tube supérieur, pour les hauteurs plus considérables.

Quand on fait une mesure, on a soin de tenir le rectangle dans

(¹) Pour la description de cet instrument, voir *Annales de l'Observatoire municipal*, 1901, p. 50.

(²) *Comptes rendus*, t. CXL, 1905, p. 960.

un plan vertical, et le plus loin possible de l'œil, en s'appuyant sur quelque objet rigide afin que le bras ne tremble pas.

Le niveau dont nous nous servions au début avait 18^{cm} de largeur et 21^{cm} de hauteur. Il était gradué de 10° en 10° et l'intervalle entre deux traits était en moyenne de 20^{mm}.

Depuis le 19 mars 1906, ce niveau a été remplacé par un autre qui a 27^{cm} de largeur et 31^{cm} de hauteur. Il est gradué de 2° en 2° et l'intervalle entre deux traits y est en moyenne de 6^{mm}, 2. On apprécie facilement le demi-degré.

Cet instrument est d'un emploi très commode et très rapide : en quelques secondes on peut répéter plusieurs fois la visée et la lecture.

L'expérience montre que, dans la plupart des cas, le théodolite ne permet pas d'atteindre une précision supérieure. C'est que l'erreur porte sur le pointé, nécessairement incertain lorsqu'il s'agit de lueurs peu intenses, difficiles à voir avec un seul œil.

Pendant les observations nous nous munissons de lunettes de verre fumé. Pour viser le Soleil, nous interposons, entre l'œil et l'instrument, un verre coloré supplémentaire.

Nous visons d'abord la lueur, puis le Soleil, puis de nouveau la lueur, si c'est possible. Il ne faut pas commencer par l'astre, parce que le phénomène peut disparaître pendant ce temps et aussi parce que l'œil risque d'être ensuite plus ou moins ébloui et fatigué. Nous notons l'heure à la demi-minute.

DEUXIÈME PARTIE.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ORIENTATION
QUE PRENNENT LES CORPS SOLIDES EN TOMBANT DANS LES FLUIDES.

Orientation des cristaux de glace.

La forme de cristaux de glace géométriquement la plus simple, la seule ou presque la seule à laquelle on ait fait jouer un rôle dans la production des halos, est celle d'un prisme droit hexagonal.

Le cristal est, soit très allongé dans le sens de l'axe principal (prismes proprement dits), soit très court, très aplati (lamelles).

Suivant l'opinion généralement admise et qui paraît avoir été énoncée pour la première fois par Babinet ⁽¹⁾, l'orientation tantôt horizontale, tantôt verticale qu'il est nécessaire de prêter aux axes pour expliquer les halos est liée à l'existence de ces deux formes types.

Les cristaux, en traversant l'air, prendraient la position qui leur assure le minimum de résistance de la part du fluide. L'axe des prismes allongés s'orienterait donc verticalement et celui des lamelles, horizontalement.

Cette prétendue *loi de moindre résistance*, pourtant sans fondement mécanique, fut admise par Bravais [non sans quelques réserves ⁽²⁾] et par presque tous ceux qui, après lui, écrivirent sur les halos ⁽³⁾.

Je noterai toutefois les doutes exprimés par Renou ⁽⁴⁾ et par moi-même ⁽⁵⁾ ainsi que l'opinion, diamétralement opposée à celle de Babinet, qu'énonçait récemment M. Wood ⁽⁶⁾ et qu'il appuyait sur quelques observations, d'ailleurs insuffisamment probantes.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. IV, 1837, p. 638.

(2) Voir *Annuaire météorologique de la France* pour 1851, p. 168.

(3) Voir, par exemple, MASCART, *Traité d'Optique*, t. III, p. 478, Paris, 1893, et PERNTER, *Meteorologische Optik*, p. 318, Wien und Leipzig, 1906.

(4) Dans plusieurs communications verbales à la Société météorologique de France.

(5) *Annuaire de la Société météorologique de France*, 1899, p. 140.

(6) *Monthly weather Review*, August 1906, p. 357.

D'après ce savant, les corps s'orienteraient de telle sorte que la résistance du milieu soit maximum et non minimum.

Depuis longtemps déjà, parmi les théoriciens et les expérimentateurs s'occupant de questions relatives à l'aviation, plusieurs avaient été amenés à étudier la chute d'une plaque mince abandonnée à la pesanteur au sein de l'air.

A. Jarolimek ⁽¹⁾ paraît avoir été le premier à traiter le sujet. Il résulte de ses recherches que, pour une lamelle homogène, la position verticale est instable et que, seule, la position horizontale correspond, dans certains cas, à un équilibre stable.

Les expériences de Fr. Ahlborn ⁽²⁾, en 1897, et celles de W. Köppen ⁽³⁾, en 1901, conduisent sur ce point à la même conclusion; mais aucun de ces trois auteurs n'a songé à appliquer les résultats obtenus aux cristaux de glace atmosphériques, auxquels ils ne sont d'ailleurs que partiellement applicables, comme on le verra.

D'autre part, leurs travaux ont eu peu de retentissement et, pour ma part, je n'en ai eu que tout récemment connaissance.

En 1906, j'ai commencé, sur l'orientation que prennent les corps solides en tombant dans les fluides, des recherches expérimentales dont j'ai communiqué les premiers résultats à la *Société météorologique*, en janvier 1907 ⁽⁴⁾.

Depuis, j'ai étendu et complété ces recherches. J'exposerai ici, dans l'ordre qui me paraît le plus logique, les méthodes employées et l'ensemble des résultats obtenus, sans faire de distinction entre ceux qui sont entièrement nouveaux et ceux que j'indiquais déjà dans mon premier Mémoire.

⁽¹⁾ *Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereins*, 1893, nos 30 et 31.

⁽²⁾ *Abhandlungen des naturwissenschaftlichen Vereins*. Hambourg, 1897.

⁽³⁾ *Illustrierte aeronautische Mittheilungen*, 1901, p. 149.

⁽⁴⁾ *Annuaire de la Société météorologique de France*, 1907, p. 40.

CHAPITRE I.

Liquides non visqueux.

I. — EXPÉRIENCES DANS LES LIQUIDES EN REPOS.

Il est facile de faire des expériences dans l'eau, en employant de petits corps en ébène ou en ébonite qu'on y fait tomber et dont on observe la chute. La densité de l'ébène est voisine de 1,2, mais varie suivant les échantillons et l'humidité du bois. Les corps en ébène, une fois taillés, étaient desséchés à l'étuve et plongés dans la paraffine fondue. L'ébonite a une densité un peu plus grande, qui varie aussi d'un échantillon à l'autre; mais cette matière a l'avantage d'être imperméable à l'eau.

Les corps employés avaient, dans leur plus grande dimension, de 5^{mm} à 25^{mm}. Je les faisais tomber dans des vases de verre cylindriques de 15^{cm} de diamètre et de 45^{cm} de hauteur.

La vitesse de chute dans l'eau variait de 14^{cm} par seconde à 6^{cm} et même à 4^{cm} pour certaines lamelles. Parmi les corps les plus lourds, plusieurs tombaient trop rapidement pour qu'il fût aisé de discerner leur position d'équilibre relatif. D'autre part, celle-ci est susceptible de changer avec la vitesse de chute. Afin de rendre les résultats aussi comparables que possible, j'ai substitué à l'eau, quand c'était nécessaire, une dissolution d'hyposulfite de soude plus ou moins concentrée, de manière que la vitesse de chute fût toujours comprise entre 6^{cm} et 8^{cm} par seconde. On verra plus loin qu'il ne se manifeste aucune action de viscosité dans les dissolutions d'hyposulfite, même les plus concentrées.

Prismes courts et lamelles. — Toutes les figures qu'on peut découper dans une plaque plane, quelle que soit leur forme, prennent en tombant la position horizontale. Un corps de cette sorte, lâché au sein de l'eau dans la position verticale, décrit une trajectoire courbe, en s'inclinant jusqu'à ce qu'il ait acquis l'horizontalité. A partir de ce moment, il tombe suivant une trajectoire verticale et plus lentement, en oscillant autour de sa position d'équilibre horizontale.

Il en est de même pour les prismes et pour les cylindres dont la plus petite dimension est la longueur.

PRISMES ALLONGÉS. — Les prismes et les cylindres allongés s'orientent horizontalement. Lâchés dans la position verticale, ils ne la conservent pas, mais s'inclinent jusqu'à ce que leur axe soit devenu horizontal.

Quant à l'orientation autour de cet axe, elle est naturellement indifférente pour le cylindre et dépend, pour les prismes, de la forme de la section droite.

Prisme triangulaire isocèle. — Si le dièdre compris entre les deux faces égales est supérieur à 60° , son arête se tient en bas. S'il est un peu inférieur à 60° , son arête regarde au contraire le haut, mais il n'y a pas à proprement parler équilibre, car le prisme oscille violemment autour de cette position moyenne, dont il s'écarte de 90° successivement de part et d'autre.

Si l'on fait décroître l'angle du dièdre, on voit apparaître une nouvelle position d'équilibre qui est fort nette pour les prismes à angle dièdre très aigu : le plan bissecteur se tient horizontalement. Le prisme se comporte alors comme une lamelle.

On remarquera que, dans le cas d'un prisme très allongé, dont le dièdre est supérieur à 60° , la position d'équilibre ne correspond certainement ni au minimum, ni au maximum de résistance. Les deux principes contraires de Babinet et de M. Wood ne sont donc pas plus exacts l'un que l'autre.

Prisme hexagonal régulier. — Pour les prismes dont la section est un polygone régulier il y a évidemment autant de positions d'équilibre autour de l'axe que le polygone a de côtés. Par suite, l'orientation est peu stable et difficile à discerner.

Comme elle est particulièrement intéressante à connaître pour le prisme hexagonal, j'ai fait tailler avec soin, par un artiste, un prisme hexagonal dans un cylindre d'ébène de 2^{cm} de longueur et de 0^{cm},2 de diamètre. Ce petit corps tombe dans l'eau en présentant vers le bas une arête, mais on peut craindre que son orientation normale ne soit altérée par un défaut d'homogénéité du bois.

CONES ET PYRAMIDES. — Le cône s'oriente de façons différentes suivant son angle au sommet. Très ouvert, il tourne sa pointe vers le bas.

Si l'angle au sommet devient inférieur à une certaine valeur, voisine de 30° , le cône se renverse et dirige sa pointe vers le haut; mais les oscillations sont beaucoup plus fortes que dans la position inverse.

Enfin, lorsque le cône devient très effilé, il tend manifestement à prendre la position horizontale.

Les pyramides régulières se comportent de la même manière que les cônes.

PRISMES TERMINÉS EN PYRAMIDE. — Les prismes terminés en pyramide, soit à une extrémité seulement, soit aux deux, s'orientent comme les prismes simples.

Si la longueur totale est sensiblement supérieure au diamètre, l'axe est horizontal; dans le cas contraire, il est vertical, et, si une seule extrémité est taillée en pyramide, c'est elle qui se place en bas.

ASSEMBLAGES DE PRISMES. — 1° *Dans un plan.* Deux prismes de même section, soudés par une de leurs extrémités, tombent dans une position horizontale, quel que soit l'angle qu'ils forment entre eux.

Il en est de même pour un assemblage quelconque de prismes de même section, dont les axes sont dans un même plan.

2° *Prismes rayonnant dans l'espace autour d'un point.* — Cette sorte d'assemblages est très difficile à réaliser. Ceux que j'ai construits se composaient, non de prismes, mais de cylindres d'ébonite, de 15^{mm} de longueur et de 3^{mm} , 5 de diamètre, appointés à un bout et soudés par leurs pointes à l'aide d'un peu de cire.

J'ai étudié spécialement le cas où les axes des prismes sont des génératrices d'un cône et forment entre eux le même angle α . J'ai reconnu d'une manière certaine que ces assemblages, quel que soit le nombre des prismes, peuvent avoir deux positions d'équilibre. L'axe de l'assemblage, c'est-à-dire l'axe du cône fictif sur lequel sont disposés les prismes, se tient horizontalement si l'angle α est

petit, verticalement si cet angle est grand, et dans ce dernier cas le point de concours des prismes se place en bas.

Les assemblages sur lesquels ont porté mes observations étaient trop grossiers pour que je pusse songer à déterminer la valeur critique de l'angle α . Cette valeur doit nécessairement diminuer quand le nombre des prismes concourants augmente. Elle m'a paru être voisine de 55° dans le cas de trois prismes et de 45° dans celui de quatre prismes. Il y aura lieu de faire à ce sujet des expériences plus précises s'il est reconnu que les assemblages de prismes de glace qui rentrent dans ce type peuvent jouer un rôle dans la production des halos.

Un autre type d'assemblages intéressant est celui où les axes des prismes concourants coïncident avec ceux d'un polyèdre régulier. Dans ce cas, l'assemblage a certainement au moins quatre positions d'équilibre s'il correspond au tétraèdre, six s'il correspond à l'hexaèdre, etc. En oscillant, il peut passer facilement de l'une à l'autre et doit se comporter comme s'il n'en avait aucune.

3° *Prismes ayant le même axe.* — a. *Cas de deux prismes.* J'ai étudié d'une façon particulièrement détaillée le cas de deux prismes, de sections et de longueurs différentes, assemblés bout à bout suivant le même axe. Ce cas se rencontre fréquemment dans la glace sous la forme d'un prisme allongé, associé à une lamelle dont la section est plus grande.

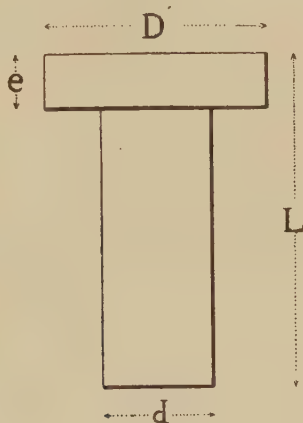
Pour plus de facilité d'exécution, les corps de cette sorte dont j'ai observé la chute étaient, en réalité, non pas prismatiques, mais cylindriques; ils étaient tournés dans l'ébonite, en une seule pièce.

Un tel corps, dont la forme rappelle celle du champignon (*fig. 3*), est défini en grandeur absolue par quatre paramètres, qui seront, si l'on veut, la longueur totale L , le diamètre de la queue d , le diamètre de la tête D et l'épaisseur de celle-ci, e ; mais, pour obtenir toutes les formes possibles, il suffit de faire varier trois de ces paramètres, le quatrième restant constant.

J'ai commencé par laisser invariables deux paramètres, D et L , que j'ai fixés respectivement à 10^{mm} et à 15^{mm} . Dans ces conditions, en faisant varier d et e de demi-millimètre en demi-

millimètre, on peut réaliser 551 corps différents. Sur ce nombre, 64 pour 100 environ orientent leur axe horizontalement ⁽¹⁾, 32 pour 100 l'orientent verticalement en présentant la tête vers le

Fig. 3.



bas, 2 pour 100 se tiennent verticalement aussi, mais en sens inverse, et enfin 2 pour 100 n'ont pas d'orientation bien définie.

La figure 4, où j'ai porté d en abscisses et e en ordonnées, indique quelle est l'orientation pour chaque couple de valeurs données à ces paramètres. Le tracé des lignes de démarcation des trois équilibres est fondé sur l'observation des 70 corps marqués sur la figure par de petites croix.

Dans le voisinage de ces lignes, les corps ont presque toujours deux positions d'équilibre et il est souvent difficile de reconnaître lequel de ces deux équilibres est le plus stable. Ce fait s'observe surtout dans la région frontière entre les deux équilibres verticaux. Il est au contraire peu marqué entre l'équilibre horizontal et l'équilibre vertical avec la tête en haut.

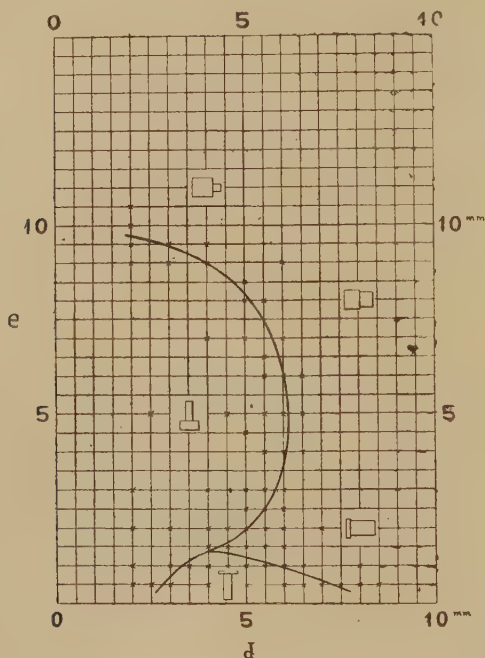
Pour certains corps, il y a même trois positions d'équilibre, c'est-à-dire qu'on peut voir le même corps exécuter durant sa

⁽¹⁾ Ou à peu près, car il est très difficile de savoir si la position de part et d'autre de laquelle le corps oscille est exactement horizontale ou en est seulement voisine.

chute des oscillations autour de l'une quelconque des trois orientations définies plus haut.

Il restait à étudier l'influence du troisième paramètre, la longueur totale L par exemple. Pour traiter la question d'une manière complète, il faudrait donner successivement à L une série de valeurs tant inférieures que supérieures à 15^{mm} et, pour chacune

Fig. 4.



d'elles, recommencer l'étude faite relativement à $L = 15^{\text{mm}}$. On obtiendrait autant de tracés analogues à la figure 4, qui représenteraient les coupes, par une suite de plans parallèles, des *surfaces* de démarcation des trois équilibres.

Sans aborder le détail, on reconnaît facilement que :

1° Si L est inférieure à D , l'axe est toujours orienté verticalement. Le corps peut se tenir, suivant la position dans laquelle on le lâche, soit la tête en bas, soit la tête en haut.

2° Lorsque, laissant D constant, on fait croître L , l'équilibre

horizontal devient de plus en plus prépondérant et il paraît tendre à subsister seul quelles que soient les valeurs de d et de e .

Je me suis borné à étudier l'influence de L : d'une part pour $d = 4^{\text{mm}}$ et $e = 1^{\text{mm}}, 5$, c'est-à-dire vers le point de rencontre des trois branches de courbes de la figure 4, et d'autre part pour de faibles valeurs de e , quel que soit d . Ce dernier cas est le seul susceptible d'une application aux cristaux de glace, chez lesquels les lamelles associées aux prismes sont toujours très minces.

$$\text{Premier cas : } \frac{d}{D} = \frac{40}{100}, \frac{e}{D} = \frac{15}{100}.$$

Pour $\frac{L}{D} = \frac{150}{100}$, ce qui est le cas de la figure 4, le corps n'a pas d'orientation bien décidée, mais se tient plutôt verticalement, la tête en bas.

Pour $\frac{L}{D} = \frac{125}{100}$, et pour les valeurs inférieures, les deux équilibres verticaux sont l'un et l'autre très stables.

Si maintenant on donne à $\frac{L}{D}$ des valeurs croissantes à partir de $\frac{150}{100}$, l'équilibre vertical, tête en bas, commence par s'affirmer davantage, puis l'orientation devient indécise et tend progressivement vers l'horizontalité. Elle en est déjà très voisine pour $\frac{L}{D} = 4$, avec une vitesse de chute de 6^{cm} par seconde.

Deuxième cas : $\frac{e}{D} \leq \frac{1}{10}$. Lorsque $\frac{L}{D}$ croît, l'orientation verticale, quel que soit son sens, tend à faire place à l'orientation horizontale. Lorsque ce rapport décroît, c'est l'inverse qui se produit.

Pour $\frac{L}{D} < 1$, l'équilibre horizontal n'est plus possible, comme je l'ai dit plus haut.

Les prismes de glace associés à une lamelle sont le plus souvent terminés en pyramide du côté opposé ⁽¹⁾. Cette particularité, ainsi que je m'en suis assuré, ne modifie pas d'une manière appréciable l'orientation; mais, lorsque celle-ci est verticale et que la

⁽¹⁾ Voir A. DOBROWOLSKI, *Résultats du voyage du S. Y. Belgica (La neige et le givre)*, p. 32 et suivantes. Anvers 1903.

lamelle se tient en haut, l'existence d'une pointe à la partie inférieure diminue les oscillations et augmente la vitesse de chute.

b. Prismes associés à deux lamelles. — Les prismes de glace sont parfois terminés aux deux bouts par des lamelles, soit égales, soit inégales.

J'ai constaté que l'adjonction d'une seule lamelle égale à la première fortifie peu l'équilibre vertical si le prisme est à la limite de cet équilibre.

Lorsque l'équilibre d'un prisme à deux lamelles inégales est vertical, il est généralement possible dans les deux sens; mais l'orientation la plus stable se trouve réalisée quand la lamelle la plus grande est en haut.

II. — CHUTE TRÈS LENTE DANS UN LIQUIDE DENSE.

La chute des corps en ébène ou en ébonite peut être rendue aussi lente qu'on le veut en employant une solution d'hyposulfite de soude d'une densité très voisine de la leur.

Lorsque la vitesse de chute n'est que de quelques millimètres à la seconde, les corps n'ont pas de position d'équilibre bien définie. Souvent elle n'est pas la même pour des corps de forme et de dimensions identiques, et elle peut varier, pour le même corps, d'une expérience à une autre.

Dans ces conditions, l'orientation est certainement due à un défaut d'homogénéité du corps et s'explique de la manière suivante :

Considérons un corps solide homogène plongé au sein d'un liquide de même densité que lui. En vertu du principe d'Archimède, il subit les mêmes pressions que celles que subirait la masse liquide dont il occupe la place; il est donc en équilibre dans n'importe quelle position. Mais pour un corps non homogène il n'en sera plus de même : si son centre de gravité ne coïncide pas avec celui d'un corps homogène qui occuperait le même volume, ou, plus brièvement, avec le centre de volume, il y aura orientation, le centre de gravité tendant à se placer le plus bas possible.

Un des prismes d'ébène à deux lamelles que j'avais construits

au début de mes recherches se comportait d'une façon singulière : quand il tombait lentement dans l'hyposulfite, il tournait toujours vers le bas sa lamelle la plus grande, alors que, dans l'eau, cette lamelle se tenait au contraire en haut, conformément à la loi générale énoncée précédemment. J'ai pu doter de la même propriété des corps semblables qui ne la présentaient pas, en immergeant pendant un certain temps leur grande lamelle dans une solution de bichlorure de mercure, puis dans du sulfhydrate d'ammoniaque. Il se forme dans les pores de l'ébène un peu de sulfure de mercure qui déplace légèrement le centre de gravité vers la grande lamelle. Ce défaut d'homogénéité, extrêmement petit, ne se manifeste en rien dans la chute au sein de l'eau, où il est absolument négligeable vis-à-vis des réactions du liquide; mais son effet devient prépondérant, au point de renverser l'orientation, lorsque le corps tombe lentement dans l'hyposulfite.

En chute lente, les lamelles manifestent une tendance marquée à tomber par la tranche. On peut s'expliquer ce fait en remarquant que, dans un corps lamellaire, les défauts d'homogénéité déplacent le centre de gravité surtout dans le plan médian parallèle aux deux grandes faces; il est donc naturel que ce plan s'oriente verticalement ou à peu près.

D'ailleurs, l'orientation des lamelles dans le plan vertical se montre toujours quelconque. Il m'a été impossible de découvrir dans la chute lente des lamelles au sein de l'hyposulfite la moindre trace d'une action de viscosité semblable à celle qui se manifeste, de la manière qu'on verra plus loin, dans les liquides très visqueux.

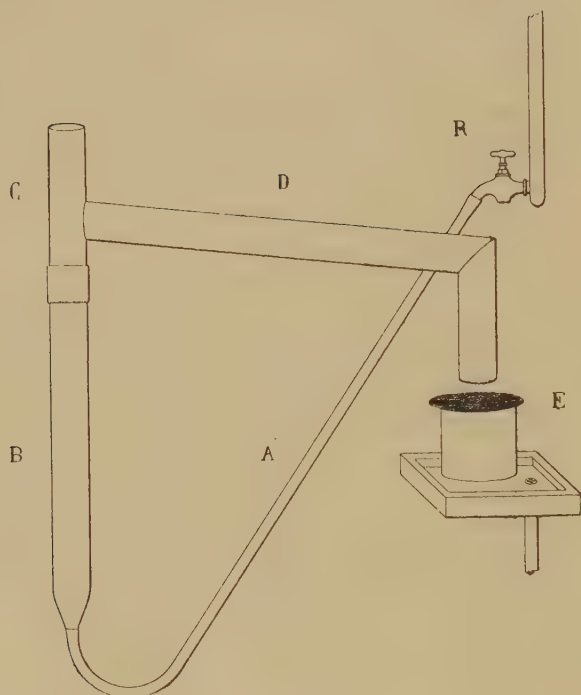
III. — EXPÉRIENCES DANS UN COURANT D'EAU VERTICAL ASCENDANT.

En faisant tomber les corps dans un courant vertical ascendant de vitesse égale à celle de leur chute, on peut les maintenir indéfiniment en suspension et observer plus commodément leur orientation. Dans ce dessein, j'ai employé le dispositif suivant :

Un tuyau de caoutchouc A (*fig. 5*) conduit l'eau dans un tube de verre B de 4^{cm} de diamètre intérieur et de 1^m de longueur, prolongé par un tuyau de cuivre C ouvert à son extrémité supérieure. L'eau s'écoule par un tuyau latéral D.

Le tube étant rempli d'eau et le robinet R fermé, on laisse tomber par l'ouverture du tuyau C le corps à étudier, puis on ouvre le robinet, qu'on règle de manière que le corps reste à une hauteur constante dans le tube. Quand on veut retirer le corps, on

Fig. 5.



augmente la vitesse du courant qui l'entraîne par le tuyau D et on le recueille sur une toile métallique E.

Au moyen de cet appareil, on peut observer l'orientation des corps en ébonite à des vitesses de chute deux ou trois fois plus grandes que dans l'hyposulfite. On constate qu'elle n'est pas toujours la même dans les deux cas. Pour les corps en forme de champignon, l'équilibre est souvent vertical dans l'eau à une vitesse de 20^{cm} par seconde, alors qu'il est horizontal dans l'hyposulfite à une vitesse de 6^{cm} ou 8^{cm} par seconde. En particulier,

si e est très petit, l'équilibre vertical, tête en haut, s'étend jusqu'à une valeur de d notablement plus grande. Dans le cas où l'on a $L = 15^{\text{mm}}$, $D = 10^{\text{mm}}$ et $e = 0^{\text{mm}}, 5$, l'équilibre reste vertical en chute rapide jusqu'à ce que d atteigne $8^{\text{mm}}, 5$. Il l'est encore très nettement lorsque la lamelle ne forme plus qu'un rebord de 1^{mm} .

CHAPITRE II.

Liquides visqueux.

En vue d'étudier l'influence de la viscosité, j'ai fait des expériences dans la glycérine et dans le sirop de glucose, à l'intérieur de grands vases en verre. L'ébène flotte sur la glycérine, mais on peut se servir de corps en ébonite, en celluloïd ou même en métal, s'il s'agit de lamelles.

Quand la chute est assez rapide, l'orientation est la même que dans les liquides non visqueux. Pour le prisme associé à une lamelle, il peut encore y avoir, suivant les cas, trois orientations différentes; mais il serait très difficile de préciser leurs conditions limites, car le corps ne s'oriente généralement qu'avec une grande lenteur et sans éprouver les oscillations qui, dans les liquides non visqueux, mettent en évidence les positions d'équilibre.

Sur les corps lamellaires, l'effet de la viscosité est beaucoup plus apparent. Si l'on découpe dans une feuille de fer-blanc de $0^{\text{mm}}, 2$ d'épaisseur une série de triangles rectangles isoscèles, de dimensions progressivement décroissantes, et si on les fait tomber dans la glycérine, on observe les faits suivants :

- 1° La chute est d'autant plus lente que le triangle est plus petit;
- 2° Si le triangle a une surface relativement grande, 500^{mm^2} par exemple, il s'oriente horizontalement comme dans l'eau;
- 3° Si la surface est plus petite, 100^{mm^2} par exemple, le triangle s'incline du côté du sommet de l'angle droit;
- 4° Pour un triangle encore plus petit, de 25^{mm^2} par exemple, l'orientation devient absolument verticale, le sommet de l'angle droit se tenant toujours en bas.

On observe les mêmes changements d'orientation si l'on opère avec des triangles de surface identique, mais de poids décroissants. Ainsi on vient de voir qu'un triangle rectangle isoscèle de 500^{mm^2} , découpé dans une feuille de fer-blanc de $0^{\text{mm}}, 2$, s'oriente horizontalement. Le même triangle, découpé dans une feuille de magnésium de $0^{\text{mm}}, 7$, tombe dans une position inclinée. Le même encore, découpé dans une feuille de celluloïd de densité convenable, se tient verticalement.

A l'action hydrodynamique ordinaire s'ajoute donc ici une autre action, attribuable évidemment à la viscosité, et qui, relativement négligeable quand la chute est rapide, devient au contraire prépondérante en chute lente.

Cette action de viscosité a pour effet d'orienter en général les lamelles verticalement. J'ai reconnu empiriquement qu'elle peut être définie de la manière suivante :

1° *Le centre de gravité du contour de la figure plane tend à se placer au-dessus du centre de gravité de l'aire;*

2° *La force directrice croît ou décroît comme le moment du poids du contour par rapport au centre de gravité de l'aire.*

Cette loi permet de prévoir l'orientation de toutes les figures planes à contour convexe. Voici quelques exemples de son application :

Triangle isoscèle. — Le sommet de l'angle compris entre les côtés égaux se tient en haut ou en bas suivant que l'angle est inférieur ou supérieur à 60° .

Trapèze isoscèle. — Soient B la grande base, b la petite, C la longueur des côtés obliques égaux, α l'angle que forment ces côtés prolongés.

Le trapèze présente vers le haut ou vers le bas sa grande base suivant que

$$B + b \gtrless C$$

ou encore suivant que

$$\sin \frac{\alpha}{2} \gtrless \frac{1}{2} \frac{B - b}{B + b};$$

ainsi le trapèze formé en coupant un hexagone régulier par une de ses diagonales tombe en présentant sa grande base vers le haut.

Segment de cercle. — Il tombe toujours la corde en haut, quelle que soit l'ouverture de l'arc, mais la force directrice diminue à mesure que cette ouverture augmente.

Secteur de cercle. — Le milieu de l'arc tend toujours à se tenir en bas.

La force directrice diminue rapidement quand l'ouverture augmente à partir de 0 et devient presque nulle lorsque l'ouverture est voisine de 90° . Si le cercle est presque complet, l'orientation reprend de la netteté. Le calcul indique en effet que la force directrice passe par un minimum pour une ouverture de 108° .

La loi des centres de gravité s'applique mal aux figures dont le contour présente des angles rentrants ou des courbures concaves de petit rayon. Les choses se passent alors comme si la longueur de ces parties du contour était diminuée.

Une dernière remarque, qui n'est peut-être pas sans intérêt pour la théorie du phénomène :

Imaginons qu'on suspende une plaque pesante par son contour au moyen de fils élastiques verticaux, équidistants, de longueur et d'élasticité identiques, attachés par leur extrémité supérieure à un plan horizontal fixe.

La plaque ne se tiendra horizontale que si son centre de gravité coïncide avec celui de son contour, sinon elle s'inclinera précisément dans le sens indiqué par la loi précédente.

CHAPITRE III.

Chute dans l'air.

Il est aisé de vérifier que, dans l'air comme dans les liquides non visqueux, les lamelles tombent à plat et les prismes allongés dans une position horizontale. Il suffit d'y observer la chute de fragments de papier mince et de petits bâtonnets de liège. J'ai

construit en bois léger divers assemblages de prismes. Lorsque ces corps tombaient trop vite pour qu'on pût distinguer leur orientation, je les recevais sur un large plateau contenant de la graisse à demi fondue où ils restaient fichés dans la position qu'ils avaient à la fin de leur course. J'ai retrouvé les équilibres constatés dans l'eau.

Toutefois, on observe dans l'air un phénomène que je n'ai pas constaté dans les liquides : c'est la rotation des lamelles, signalée par Jarolimek (*voir* p. 32).

Un cercle ou un polygone régulier, de quelques centimètres carrés de surface, découpé dans un papier assez rigide pour ne pas se déformer sous la pression de l'air, tombe en tournant rapidement autour d'un axe horizontal contenu dans son plan. Les figures allongées, telles qu'une ellipse ou un rectangle, tournent toujours autour de leur plus long axe de symétrie.

Ce mouvement de rotation n'a pas lieu dans tous les cas, mais paraît lié à certaines conditions de dimensions et de vitesse de chute. Il cesse de se produire lorsque l'épaisseur et la surface du corps lamellaire deviennent très petites. Ainsi un carré de 2 mm^2 à 3 mm^2 de surface, découpé dans du papier à cigarettes, tombe en oscillant fortement autour de la position horizontale, mais ne tourne pas. Les oscillations s'atténuent rapidement quand la surface décroît; elles disparaissent à peu près complètement dès que celle-ci se réduit à 1 mm^2 .

Si la surface de base était le seul élément à considérer, on pourrait conclure de ce qui précède que les lamelles hexagonales de glace atmosphérique ne tournent pas en tombant. Au voisinage du sol, d'après les observations concordantes de M. Hellmann ⁽¹⁾ et de M. Dobrowolski ⁽²⁾, leur diamètre moyen est de $1\text{ mm}, 3$, ce qui correspond à une surface de $1\text{ mm}^2, 1$. A l'altitude des cirrus, leurs dimensions sont certainement beaucoup plus faibles, car elles diminuent à la fois avec la température et avec la tension de la vapeur d'eau.

Mais il faudrait être assuré que, toutes choses égales d'ailleurs,

(1) HELLMANN, *Schneekrystalle*, p. 34. Berlin, 1893.

(2) DOBROWOLSKI, *Résultats du voyage du S. Y. Belgica en 1897, 1898 et 1899 (La neige et le givre)*, p. 11.

la tendance à la rotation n'augmente pas quand la densité de l'air décroît. Il faudrait, en outre, savoir comment varie cette tendance suivant la vitesse de chute, c'est-à-dire suivant l'épaisseur des lamelles et leur poids spécifique.

Faute de données suffisantes, la question reste insoluble. Cependant, un fait constaté par M. Dobrowolski ⁽¹⁾ semble bien montrer que la chute des lamelles de glace s'effectue sans rotation : lorsque celles-ci sont chargées de givre, le dépôt affecte en général inégalement les deux bases et parfois même se montre exclusivement sur l'une d'elles, comme si le cristal avait constamment tourné la même face vers le bas.

M. Köppen ⁽²⁾ a fait récemment quelques expériences sur des prismes allongés, qu'il constituait en prenant « un quart de feuille de papier à lettre », le pliant en un prisme de trois côtés ou plus, réunissant les bords libres à l'aide de languettes et y adaptant deux bases. Il a reconnu que ces corps, en tombant dans l'air, tournaient autour de leur axe, mais que la tendance à la rotation diminuait à mesure que la section droite du prisme se rapprochait du cercle et était peu sensible pour un prisme hexagonal.

Une telle rotation serait d'ailleurs sans importance en ce qui concerne la théorie des halos, car il est optiquement indifférent de supposer que les prismes à axe horizontal tournent sur eux-mêmes, ou qu'ils s'orientent autour de leur axe d'une manière permanente mais quelconque et variable d'un prisme à l'autre.

Dans le cas où les cristaux de glace sont extrêmement petits, une nouvelle difficulté se présente. Les auteurs qui en ont observé près du sol dans les régions polaires ont eu souvent l'impression qu'ils étaient comme suspendus dans l'air. Or il y a une grande analogie entre des cristaux de glace tombant très lentement dans un gaz beaucoup moins dense qu'eux et des corps métalliques tombant lentement dans la glycérine, dont la densité est 5 ou 6 fois plus petite que la leur. Dans les deux cas, le ralentissement de la chute est dû à la viscosité du fluide. Si cette propriété pouvait être considérée comme ayant dans l'air le même effet que dans les liquides sur l'orientation des lamelles, il en résulterait

⁽¹⁾ *Loc. cit.*, p. 48.

⁽²⁾ *Meteorologische Zeitschrift*, juin 1908, p. 280.

que les lamelles de glace très petites s'orienteraient non pas horizontalement mais verticalement.

L'expérience serait bien difficile à réaliser, car on ne voit pas comment on pourrait obtenir des lamelles d'épaisseur uniforme, parfaitement homogènes et assez petites pour ne tomber dans l'air qu'avec une grande lenteur.

Il subsiste donc, sur les lois applicables à l'orientation de pareils cristaux de glace, une incertitude qu'il paraît impossible de lever. Mais la question qui se pose immédiatement est celle-ci : les cristaux de glace qui donnent naissance aux halos et spécialement ceux qui engendrent les phénomènes impliquant l'orientation peuvent-ils être considérés comme en quasi-suspension dans l'air ?

Plusieurs considérations conduisent à répondre par la négative. Tout d'abord il convient de remarquer que les halos se produisent presque toujours à une grande hauteur, dans un air raréfié qui oppose à la chute des cristaux de glace une résistance bien moindre qu'à la pression ordinaire.

En second lieu, les conditions dans lesquelles se montrent habituellement les arcs tangents, parhélies, etc., ne sont guère conciliables avec l'hypothèse de la suspension. Ils apparaissent et s'effacent presque toujours brusquement. Les parhélies et l'arc circumzénithal, en particulier, s'illuminent *par bouffées*, comme un foyer dans lequel on jette une pelletée de combustible vite consumé.

C'est de cette manière que se sont montrés, quelques instants seulement, l'anthélie, les paranthélies ordinaires et un paranthélie de 90° , le 5 avril 1899.

Le caractère fugitif de ces apparitions s'explique très bien si l'on admet que les cristaux, une fois formés, tombent assez rapidement, s'orientent, puis, après avoir fourni une certaine course, disparaissent par fusion ou par évaporation.

Cette interprétation est confirmée par l'aspect des nuages producteurs de parhélies, d'arcs tangents, etc., lesquels ont très souvent la forme de traînées descendantes. Je pourrais en citer de nombreux exemples. Tel a été le cas, notamment, pour l'arc circumzénithal si remarquable du 29 octobre 1906 et pour les fragments d'arc circumhorizontal vers le 15 juin 1908.

La chute rapide des cristaux de glace se révèle souvent aussi d'une autre façon : ils forment d'abord un cirro-stratus transparent

et très élevé. Ce voile s'épaissit à vue d'œil, sur place, et devient, parfois en moins d'une demi-heure, presque opaque. La surface inférieure se couvre de frisures grises, dont l'altitude est certainement inférieure de plusieurs milliers de mètres à celle du cirro-stratus primitif. La pluie peut alors survenir, ou bien la nappe nuageuse se divise en feuillets superposés et se dissipe plus ou moins complètement.

Cet abaissement progressif du nuage ne semble explicable que par la chute de ses particules. Or il est alors souvent accompagné de phénomènes optiques impliquant l'orientation. Ainsi, le 25 avril 1908, j'ai observé, dans un cirro-stratus qui s'épaississait rapidement, les parhélies, le halo de 46° et l'arc circumzénithal.

J'admettrai donc que les cristaux de glace qui donnent naissance aux parhélies, aux arcs tangents et à tous les autres phénomènes attribuables à des prismes orientés, tombent assez rapidement pour que l'action de la viscosité, s'il s'en manifeste une de cette sorte dans l'air, soit négligeable vis-à-vis de l'action dynamique. On a vu que celle-ci est, dans l'air, la même que dans les liquides sauf peut être pour les lamelles, dont le rôle dans la formation des halos paraît, d'ailleurs, des plus restreints. Il sera donc permis d'appliquer, à l'orientation des cristaux de glace atmosphériques, les lois générales auxquelles conduit l'étude expérimentale de l'orientation des corps dans les liquides non visqueux.

TROISIÈME PARTIE.

EXAMEN DE LA THÉORIE DES DIVERSES FORMES DE HALOS.

Je me propose maintenant de passer en revue les principales formes de halos et, pour chacune d'elles, de rechercher, parmi les divers types de cristaux de glace connus, quel est celui qui rend le mieux compte du phénomène, tant en raison de ses propriétés optiques qu'en raison de l'orientation qu'il doit acquérir en tombant. Dans plusieurs cas, je serai conduit à une explication nouvelle. Dans d'autres, les observations faites à Montsouris me permettront de confirmer la théorie de Bravais par des vérifications numériques auxquelles elle n'avait pas été soumise encore.

Arcs tangents du halo de 22°.

La théorie d'Young, de Venturi et de Bravais ⁽¹⁾, fondée sur la réfraction dans des prismes optiques de 60° assujettis à la seule condition que leur arête soit horizontale, rend très bien compte de toutes les particularités de ces phénomènes.

Ils sont attribuables aux prismes allongés, de préférence à ceux qui ont deux bases planes, ou encore à ceux munis aux deux extrémités de lamelles égales et peu saillantes ⁽²⁾.

L'opinion admise jusqu'à présent, d'après laquelle ces arcs seraient engendrés par des prismes lamellaires, est insoutenable pour deux raisons :

1° Parce que les lamelles ne tombent pas dans la position requise;

2° Parce qu'étant toujours très minces elles ne peuvent réfracter

(1) *Journal de l'École Polytechnique*, 31^e Cahier, p. 50.

(2) M. Dobrowolski m'a fait remarquer que les prismes pointus, associés ou non à une lamelle, présentent une cavité axiale de forme grossièrement conique et que le déplacement du centre de gravité qui en résulte peut altérer l'équilibre du cristal. On échappe à cette incertitude en s'adressant aux formes à deux bases planes, dans lesquelles il y a deux cavités symétriques qui ne peuvent causer de perturbation.

la lumière que dans la section principale et ne sauraient expliquer les parties latérales des arcs tangents, dues à une réfraction très oblique.

Parhélies de 22°.

Les cristaux qui produisent les parhélies doivent présenter des prismes optiques de 60°, à arête verticale, susceptibles de réfracter la lumière très obliquement. Cette dernière condition exclut les lamelles. Quant aux prismes allongés simples, auxquels on les attribuait, ils s'orientent horizontalement et non verticalement, comme on le croyait.

Les seules formes de cristaux de glace qui puissent produire les parhélies me paraissent être les prismes allongés qui sont associés, soit à une, soit à deux lamelles (*fig. 6, 7 et 8*).

Fig. 6.

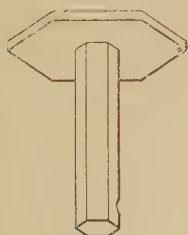


Fig. 7.

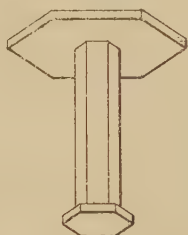
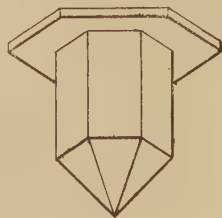


Fig. 8.



La forme représentée par la figure 8 est particulièrement propre à rendre compte des parhélies ronds, bien colorés et prolongés par une queue blanche, c'est-à-dire de ceux dont l'aspect implique une orientation presque parfaite des cristaux producteurs. Elle peut en effet *amber* sans balancements grâce à sa proue pointue qui fend le fluide. Il sera nécessaire de s'adresser à cette forme toutes les fois qu'on aura besoin de supposer une orientation verticale très stable des axes.

Arcs de Lowitz.

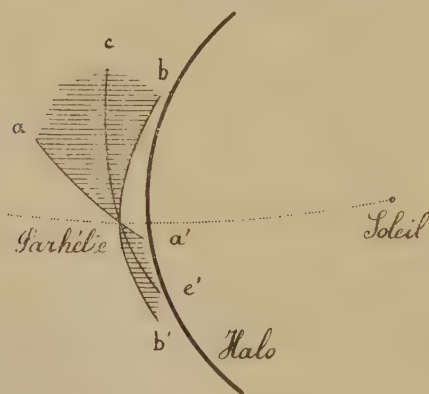
Galle ⁽¹⁾ leur a assigné comme cause les balancements des prismes verticaux qui engendrent les parhélies.

(¹) *Pogg. Ann.*, t. XLIX, p. 274.

Cette explication a été développée par Bravais et reprise récemment par Pernter ⁽¹⁾, qui a réussi à élucider plusieurs points restés obscurs. L'exposé qu'en fait Pernter ne me paraît pas, toutefois, entièrement satisfaisant. Il calcule la courbe produite par les balancements dans le vertical solaire et il la considère comme constituant la partie essentielle du phénomène, les balancements qui s'effectuent dans les autres plans n'ayant, selon lui, pour effet que d'élargir la bande lumineuse.

Cette expression d'*élargissement* ne donne peut-être pas une idée très exacte de la réalité. Si l'on trace sur une sphère matérielle, à l'aide d'une construction géométrique, les courbes produites par les balancements dans les divers plans, par une hauteur de Soleil de 25° par exemple, on obtient le résultat représenté par la figure 9. La courbe *apa'* résulte des balancements qui s'effec-

Fig. 9.



tuent dans le vertical solaire; la courbe *bpb'* correspond au vertical perpendiculaire et la courbe *cpc'*, aux deux verticaux formant un angle de 45° avec les précédents.

L'ensemble des courbes constitue deux éventails lumineux, opposés par le sommet. Celui du bas est beaucoup moins ouvert, la lumière y est plus concentrée et l'on conçoit qu'il donne seul l'apparence d'un arc plus ou moins long.

(1) *Meteorologische Optik*, p. 322 et suivantes.

Généralement, les arcs de Lowitz ne se manifestent qu'à l'état d'ébauche par la forme crochue que prennent les parhélies. Nous ne les avons jamais vus à Montsouris que sous cette forme rudimentaire.

Les arcs de Lowitz doivent être attribués aux types de cristaux de glace représentés par les figures 6 et 7.

Cercle parhélique.

Comme l'a montré Young (1), le cercle parhélique est dû à la réflexion de la lumière sur les faces latérales des prismes à axe vertical. Il ne peut se montrer que si ces prismes restent parfaitement orientés car, pour peu que les axes se balancent, la lumière réfléchie s'étale en large bande et cesse d'être distincte. Telle est la raison pour laquelle ce phénomène est beaucoup plus rare que les parhélies et que l'arc circumzénithal. La forme de la figure 9 paraît seule capable de le produire.

Arc circumzénithal.

Aspect et particularités du phénomène. — C'est un arc coloré qui se montre au-dessus du Soleil, à une distance de cet astre qui est généralement voisine de 46° , mais peut atteindre et même dépasser 50° . Son point médian, qui est aussi le point le plus brillant, se trouve dans le vertical solaire. Quant à sa forme, s'il est court, on peut seulement dire qu'il est convexe du côté du Soleil; s'il s'allonge quelque peu, on a l'impression que sa courbure est uniforme et qu'il est horizontal. C'est donc un arc de cercle ayant pour centre le zénith, d'où son nom d'arc circumzénithal. Lorsque le grand halo de 46° de rayon paraît en même temps, les deux courbes sont tangentes ou à peu près, d'où le nom d'arc tangent supérieur du halo de 46° qu'on lui donne aussi.

Ses couleurs sont souvent remarquablement pures : on distingue en bas le rouge, puis le jaune en passant par l'orangé, puis le vert, puis, mais pas toujours, le bleu et le violet. Cette dernière couleur

(1) *A cours of lectures*, t. II, p. 306.

est fréquemment absente, mais il n'est pas rare qu'elle soit visible très nettement. Fait important à noter : le violet, quand il existe, est très pur, il n'est jamais surmonté ou mêlé de blanc, comme dans les arcs tangents au halo de 22° . La coloration offre une intensité des plus variables : faible parfois au point d'être à peine perceptible, elle est d'autres fois aussi éclatante que celle du plus bel arc-en-ciel.

L'arc circumzénithal reste généralement visible peu de temps, 5 minutes en moyenne, ce qui n'est pas pour en faciliter l'étude : pendant l'année 1903, qui a été particulièrement peu favorable sous ce rapport, nous n'avons vu que quatre arcs circumzénithaux : deux d'entre eux ont persisté 2 minutes et les deux autres moins de 1 minute.

D'après notre statistique de 124 apparitions réparties sur 10 années d'observations, l'arc circumzénithal se montre 23 fois sur 100 sans être accompagné d'aucun autre phénomène de halo. Deux fois seulement nous avons observé simultanément le halo de 46° . Dans 51 cas sur 100, on voit les parhélies, soit en même temps, soit un peu avant ou après. Il est rare qu'un nuage qui les a donnés ne donne pas ensuite l'arc circumzénithal s'il passe à l'endroit du ciel où celui-ci se montre et si la hauteur du Soleil est favorable.

Théorie de Galle. — Galle ⁽¹⁾ est le premier qui ait tenté avec quelque succès l'explication de ce phénomène. Il le considère comme engendré par des prismes de glace hexagonaux dont l'axe est vertical ou plutôt à peu près vertical. La lumière entre par la base supérieure et sort par une face latérale après s'être réfractée dans le prisme optique de 90° constitué par ces deux faces. Galle remarque qu'un tel prisme optique, *dont l'arête est dirigée vers un point déterminé de l'horizon* et dont les deux faces ont une inclinaison donnée, n'est au minimum de déviation que si le Soleil est à une certaine hauteur convenable. Dans le cas où il n'en est pas ainsi, il admet que les balancements de l'axe du cristal amènent le prisme à la position voulue.

Cela revient à dire que le phénomène est produit par des prismes

(¹) *Pogg. Ann.*, t. XLIX, p. 261.

optiques de 90° *assujettis à la seule condition d'avoir leur arête horizontale*. La théorie est alors la même que celle de l'arc tangent au halo de 22° . Elle n'en diffère qu'en ce que l'angle du prisme est ici de 90° au lieu de 60° . Bravais l'a développée d'une manière complète et a montré qu'elle conduit à une courbe dont la forme est fort éloignée de celle qu'indique l'observation.

Théorie de Bravais. — Modifiant alors l'hypothèse de Galle, il a admis que les axes des prismes de glace restaient tout à fait verticaux et a fait voir que la lumière réfractée est, dans ce cas, *efficace par dispersion conique*. L'apparence lumineuse qui en résulte est un arc de cercle horizontal, dont la longueur est limitée par la réflexion totale que subissent les rayons à l'intérieur du cristal quand leur inclinaison est trop grande par rapport à la face de sortie et dont la hauteur h est liée à la hauteur H du Soleil par la formule

$$\sin h = \sqrt{n^2 - \cos^2 H},$$

n étant l'indice de réfraction.

D'après cette formule, l'arc n'est exactement tangent au grand halo que si le Soleil est à $22^\circ 8'$. A mesure que l'astre s'éloigne de cette hauteur, dans un sens ou dans l'autre, l'arc s'écarte progressivement du halo en se rapprochant du zénith.

Suivant la théorie de Galle, au contraire, l'arc serait toujours tangent au halo, autrement dit sa distance au Soleil serait toujours de $45^\circ 44'$.

A l'époque de Bravais, les observations n'avaient pas encore fourni sur ce point une réponse décisive, mais en 1882 et 1883 M. Ekama ⁽¹⁾ fit plusieurs mesures de la hauteur de l'arc par Soleil très bas, qui confirmèrent pleinement la théorie de Bravais. Il trouva notamment, le Soleil étant à $7^\circ 11'$, une hauteur supérieure de $6' 16''$ au rayon du grand halo et ne différant que de $0^\circ 23'$ de celle qui se déduit de la formule de Bravais.

Examen des arguments de Pernter contre la théorie

(¹) *Mijne waarnemingen omtrent de Halo (Academisch Proefschrift, Haarlem, p. 58).*

de Bravais. — Dans son optique météorologique, Pernter a néanmoins adopté la théorie de Galle, qui rendrait mieux compte, d'après lui, du phénomène normal, tandis que celle de Bravais ne serait valable que dans quelques cas exceptionnels.

A la suite de la publication faite par moi ⁽¹⁾ de 18 mesures d'arc circumzénithal vérifiant la formule de Bravais, Pernter a modifié un peu ses conclusions ⁽²⁾. Il admet maintenant la réalité et même la fréquence de l'arc de Bravais, mais il est d'avis que l'arc de Galle se produit également et sans doute plus fréquemment encore.

Estimant que des prismes au minimum de déviation peuvent seuls donner naissance à un phénomène brillamment coloré, il considère comme des arcs de Galle tous ceux qui présentent des couleurs nettes et brillantes. En outre, pour prouver que l'arc qui répond à la théorie de Galle a été réellement observé, il invoque les faits suivants :

1° L'observation faite par Weidler en 1735, d'un arc dont la distance au Soleil aurait été de $45^{\circ}30'$. L'astre se trouvait à $15^{\circ}30'$ de hauteur. Dans ces conditions, l'arc aurait dû être $1^{\circ}33'$ plus haut d'après la théorie de Bravais et $0^{\circ}14'$ plus haut d'après celle de Galle.

On pourrait trouver un cas semblable dans nos observations de Montsouris reproduites plus loin : la mesure n° 22 (p. 62) indique pour la hauteur de l'arc un nombre inférieur de $1^{\circ}40'$ à la hauteur théorique, et qui ne diffère que de $0^{\circ}15'$ de la valeur fournie par la théorie de Galle, mais on remarque dans le même Tableau d'autres écarts de même signe et du même ordre de grandeur qui conduiraient à une conclusion différente. Ainsi, pour la mesure n° 10, l'écart est de $-1^{\circ}12'$ relativement à l'hypothèse de Bravais, et de $+1^{\circ}37'$ relativement à celle de Galle. On en trouve aussi pour des hauteurs solaires pour lesquelles la distance théorique de l'arc est sensiblement la même dans les deux hypothèses (n°s 54 et 66). Enfin on en trouve d'aussi grandes mais de signe contraire (n°s 34 et 50).

(1) *Comptes rendus*, 5 novembre 1906.

(2) *Zur Theorie der schönsten der Haloerscheinungen. (Sitzungsberichten der K. Akademie der Wissenschaften in Wien. Math.-naturw. Klasse. Band CXVI, Jänner 1907.)*

Tous ces écarts ne sont très probablement que des erreurs d'observation et la supposition la plus vraisemblable qu'on puisse faire est qu'il s'en est glissé une dans la mesure faite par Weidler.

2° Le dessin de Lowitz (1) relatif au halo observé par lui à Saint-Petersbourg le 18 juin 1790 (vieux style).

L'arc circumzénithal y est représenté en contact avec le grand halo alors que ces deux courbes auraient dû être séparées par un intervalle d'au moins 6°, s'il est vrai que l'observation n'a pas commencé avant 7^h 30^m du matin.

Lowitz a rassemblé dans le même dessin des apparences constatées à des heures différentes. N'aurait-il pas complété son dessin, relativement à l'arc circumzénithal, d'après les indications d'une autre personne qui aurait vu cet arc avant 7^h 30^m? En tous cas, il lui donne la forme d'une demi-circonférence ayant pour centre le zénith, ce qui est en complet désaccord avec la théorie de Galle.

3° Plusieurs descriptions d'arcs qui n'auraient pas paru horizontaux : « ses extrémités regardaient le zénith » (Maraldi); « arcus cruribus sursum versis » (Gmelin); « l'arc avait la forme d'un grand croissant » (Chetwode).

Il est assez naturel de comparer à un croissant un arc de circonférence de faible rayon, horizontal ou non. Dans les deux autres cas il semble bien que les branches de l'arc ont paru ascendantes aux observateurs. C'est là une impression qu'il faut évidemment enregistrer mais à laquelle il est prudent de n'accorder qu'une importance très limitée.

4° Quatre dessins d'après lesquels l'arc n'aurait pas eu son centre au zénith.

Pernter fait lui-même à ce sujet quelques réserves. Ces dessins renferment des inexactitudes évidentes et d'ailleurs, dans le mode de projection employé, les courbes ne peuvent conserver ni leur forme, ni leurs proportions réelles.

Tout cela est, en somme, assez peu concluant, mais le point capital de la question n'est pas là. Je crois pouvoir démontrer que la théorie de Galle est essentiellement inexacte et que l'arc auquel elle conduit ne peut pas se produire.

(1) HELLMANN, *Neudrucke*. Nr 14, *Meteorolog. Optik*.

Inexactitude de la théorie de Galle. — J'ai déjà dit que cette théorie est tout à fait semblable, au point de vue géométrique, à celle de l'arc tangent au halo de $22''$, mais, au point de vue physique, il y a entre les deux cas une très importante différence.

Les prismes hexagonaux d'axe horizontal qui donnent l'arc de 22° n'ont pas d'orientation déterminée autour de cet axe. Leurs faces latérales, c'est-à-dire celles des prismes réfracteurs de 60° , peuvent prendre une inclinaison quelconque sans que les arêtes cessent d'être horizontales.

Il n'en est pas de même dans le cas des cristaux à axe vertical. Pour que les faces du prisme optique de 90° acquièrent l'inclinaison correspondant à la déviation minimum, Galle fait tourner ce prisme autour de son arête horizontale, mais, du même coup, il incline les arêtes des cinq autres prismes semblables formés par la réunion des cinq autres faces latérales avec la base supérieure. Ici, l'horizontalité de l'arête des prismes ne peut donc être qu'accidentelle. Du moment que les axes des cristaux de glace oscillent autour de la verticale, les arêtes des prismes optiques de 90° oscillent nécessairement eux-mêmes autour de l'horizontale. Aux diverses inclinaisons que peuvent prendre ces arêtes correspondent autant d'arcs différents, parmi lesquels se trouve celui que Galle retient arbitrairement à l'exclusion de tous les autres.

L'ensemble de ces arcs recouvre, au-dessus et en dehors du cercle de $46'$, une aire qui a la forme d'un double éventail et dont il est facile de tracer le contour par construction géométrique sur une sphère matérielle, en se donnant la hauteur du Soleil et la valeur maximum de l'inclinaison des arêtes.

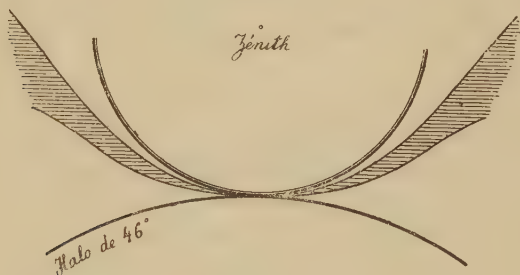
La figure 10 a été obtenue de cette manière. Elle correspond à une hauteur de Soleil de 22° et à des balancements de 10° d'amplitude. Le trait qui limite inférieurement l'aire couverte de hachures représente l'*arc de Galle* et le trait double l'*arc de Bravais*.

En réalité, il y a autant d'aires de cette sorte que de couleurs dans le spectre. Toutes ces aires se superposent en partie, et tendent à donner du blanc, sauf au bord le plus près du Soleil où le rouge est pur.

Ainsi l'hypothèse des balancements, loin d'expliquer la netteté et l'éclat des couleurs de l'arc circumzénithal, conduit à un phénomène d'aspect entièrement différent et qui, de plus, ne saurait présenter que des couleurs diffuses.

Sous cette forme, j'accorde à Pernter que l'arc de Galle existe réellement. Il n'est pas rare de voir des *parhélies verticales de 46°* ou, comme nous les appelons, des *sommets du halo de 46°* , constitués par des arcs courts, larges et diffus, dont la courbure est indécise et paraît varier d'un instant à l'autre. J'ai même vu une fois un arc circumzénithal notablement plus large vers les extrémités que vers le milieu, et répondant assez bien à la partie centrale de la figure 10. Ce sont là des formes plus ou moins bâ-

Fig. 10.



tardes de l'arc, certainement attribuables aux balancements des prismes.

Pernter considère comme dus à des prismes au minimum de déviation, les arcs circumzénithaux brillants et bien colorés. Je lui objecterai que, s'il en était ainsi, le phénomène serait bordé, du côté opposé au Soleil, comme l'arc tangent au halo de 22° et comme les parhélies, d'une lumière blanche produite par les prismes qui ne se trouvent pas dans la position de déviation minimum. Or, comme je l'ai dit plus haut, dans les beaux arcs circumzénithaux, brillants et bien colorés, où le violet est visible, cette couleur s'éteint insensiblement vers le haut en restant pure et n'est jamais mêlée ni surmontée de blanc.

Un autre argument qu'on peut invoquer contre la manière de voir de Pernter est le suivant :

Les hauteurs solaires limites entre lesquelles peut se produire le phénomène, tel qu'il le conçoit, dépendent de l'amplitude que peuvent atteindre les balancements des prismes. Si ces balancements sont nuls, l'arc ne peut se montrer que quand le Soleil est

à $22^{\circ}8'$. Si les axes des prismes oscillent autour de la verticale sans s'en éloigner d'un angle supérieur à α , l'arc est possible entre les hauteurs solaires $22^{\circ}8' - \alpha$ et $22^{\circ}8' + \alpha$. On en conclut que la courbe représentant la fréquence de l'arc en fonction de la hauteur solaire devrait être symétrique par rapport à l'ordonnée $22^{\circ}8'$. La simple inspection des résultats de notre statistique (p. 24) montre que la réalité est tout autre.

En résumé, la théorie de Galle n'est pas soutenable *a priori* et les conséquences qu'on en peut tirer sont contredites par l'observation. C'est donc avec raison que Bravais l'a rejetée. Celle qu'il lui a substituée est au contraire confirmée par les faits dans toutes ses conséquences, ainsi que je vais maintenant le montrer.

Distance angulaire de l'arc au Soleil. — Elle n'est pas aisée à mesurer à cause de la grande élévation de l'arc dans le ciel, et aussi à cause de la brièveté ordinaire de son apparition.

Pernter, qui a groupé dans son dernier travail ⁽¹⁾ toutes les mesures qui ont été faites de la hauteur de l'arc, n'en a trouvé que 17 avant les nôtres. Du 26 mars 1905 au 13 juin 1908, nous avons pu, M. Dutheil et moi, en effectuer à Montsouris 91, se rapportant à 49 arcs différents. Pour un certain nombre d'entre elles, nous avons pris séparément la hauteur des diverses couleurs visibles. Toutes ces mesures, dont 73 sont entièrement inédites, ont été rassemblées dans le Tableau ci-contre où elles sont rangées par ordre de hauteurs de Soleil croissantes. La hauteur solaire indiquée est la hauteur *vraie*, calculée d'après l'heure de l'observation. J'ai pensé qu'il convenait de préférer la hauteur vraie à la hauteur apparente, en raison de ce que, aux grandes altitudes où se tiennent les cristaux de glace, le faisceau lumineux incident subit une réfraction atmosphérique très faible et d'ailleurs inconnue. Pour le faisceau qui, sortant du cristal, va frapper l'œil, cette réfraction est sensiblement nulle à cause de la grande hauteur angulaire du phénomène.

À côté de la hauteur observée, j'indique l'écart entre celle-ci et la hauteur calculée à l'aide de la formule de Bravais.

Pour éliminer autant que possible les erreurs accidentelles, j'ai

(1) *Zur Theorie der schönsten der Haloerscheinungen*, p. 10.

fait la moyenne de ces écarts, en formant 5 groupes, suivant la hauteur du Soleil et en commençant par faire, pour chaque mesure, la moyenne des écarts relatifs aux diverses couleurs :

Hauteur du Soleil.	Distance théorique de l'arc au grand halo.	Erreur moyenne.	Nombre de mesures.
$5-10^{\circ}$	$7.30' \text{ à } 4.30'$	$-10'$	6
$11-14$	3 à 2	$-34'$	17
$15-18$	1.30 à 0.30	$-11'$	21
$19-25$	< 0.30	$+ 5'$	41
$26-27$	0.30 à 1.15	$- 1'$	6

Mesures de la hauteur de l'arc circumzénithal au-dessus de l'horizon.

N.	Date.	Heure. h m s	Hauteur du Soleil. ° ' "	Couleur visée.	Hauteur du phénomène. ° ' "	Erreur. " "	Amplitude de l'arc.	Coloration.	Instru- ment.
1.	1906, Oct.	13... 16. 9	4.59	.	58	0 15	Très long, étroit	.	N
2.	"	13... 16. 6.30	5.20	.	58	-0.19	"	.	N
3.	"	13... 16. 3	5.50	.	58	-0.25	"	.	N
4.	1905, Mars	26... 17.28	7.49	.	59	+0.1	Court	Très pâle	N
5.	" Août	8... 18.17.30	10. 5	.	60	+0.13	"	Pâle	N
6.	1907, Mai	9... 18.13.30	10. 6	.	59.30	-0.17	Très court	Beau	N
7.	"	9... 18. 6	11.20	.	59.30	-0.49	"	Très pâle	N
8.	1906, Oct.	13... 15.21	11.36	Violet	62	+0.19	"	Très brillant	N
9.	"	13... 15.19	11.53	Jaune	61	+0.39	"	"	N
10.	"	13... 15.53	12. 9	Rouge	59.30	-0.32	"	"	N
11.	" Mai	10... 18. 2	12.10	.	59.30	-1.12	"	"	N
12.	" Oct.	13... 15.51.30	12.22	.	60	-0.42	"	"	N
13.	"	13... 15.50.30	12.31	.	60	-0.48	"	"	N
14.	"	29... 15.14	12.31	.	60	-0.52	"	"	N
15.	1908, Avril	1... 17. 8.30	12.33	.	60.30	-0.22	"	"	N
16.	1906, Oct.	13... 15.48.30	12.49	.	61	+0. 7	"	"	N
17.	1908, Avril	1... 17. 6	12.57	Violet	60.30	-0.31	Demi-ampl. dr. = 25°	"	N
18.	1906, Oct.	5... 16. 5	13. 7	Rouge	61.30	-0.52	"	"	N
19.	" Juillet	8... 18.27	13.16	Vert	60	-0.34	"	"	N
20.	1908, Janv.	13... 14.24.30	13.40	Rouge	62	+0.33	Ampl. de 90° environ	Pas de violet	N
21.	1905, Juillet	4... 18.25	13.45	.	60.30	-0.9	"	"	N
22.	" Juin	27... 18.24	14. 1	Rouge	61	+0. 4	"	"	N
23.	1908, Janv.	13... 14.20	14. 3	.	60.30	-1. 1	"	Très brillant	N
24.	1907, Mai	26... 18. 2	14.49	Rouge	61.40	-1.40	"	"	N
				Violet	61.15	-0. 5	"	"	N
				.	63.15	+0.17	"	"	N
				.	62	-0. 8	Court	Pâle	N

Mesures de la hauteur de l'arc circumzénithal au-dessus de l'horizon (suite).

N°.	Date.	Heure. h m s	Hauteur du Soleil. °	Couleur visée.	Hauteur du phénomène. °	Erreur. 0 /	Amplitude de l'arc.	Coloration.	Instru- ment.
25.	1907. Mai	1... 17.34	14.54	.	61.30	-0.41	Court	Très pâle	N
26.	» Sept.	12... 16.46	14.55	.	62	-0.11	.	Très vague	N
27.	1906. Mars	8... 16.11	15.10	.	62	-0.21	.	Coul. pâles et troubles	n
28.	1907. Sept.	12... 16.44	15.14	.	62	-0.23	Court	Couleurs troubles	N
29.	1906. Mars	8... 16.9	15.28	.	63	+0.28	.	Coul. pâles et troubles	n
30.	1907. Mai	17.29	15.44	.	62	-0.42	Court	Très pâle	N
31.	1903. Juillet	4... 13.10	16.6	{ Rouge Violet	62.30 64.30	+0.7 +0.14	.	Exceptionn. brillant	n
32.	» Oct.	31... 14.40	16.8	.	62	-0.57	Court	Très net	n
33.	1906. Mars	8... 16.4	16.12	{ Rouge Violet	63 66	+0.29 +1.36	.	Coul. pâles et troubles	n
34.	» Oct.	5... 15.43	16.19	.	63	-1.0	.	.	N
35.	1907. Juin	11... 17.57	17.29	{ Jaune-vert. Violet	63.30 64.30 65.30	+0.10 +0.36 +0.15	.	Vivement coloré	N
36.	» Nov.	4... 9.3	17.44	Jaune-vert.	64.30	+0.26	.	Pâle	N
37.	1906. Déc.	27... 11.58	17.49	.	63	-1.8	90° environ	Couleurs troubles	N
38.	1907. Juin	11... 17.54	17.58	.	64	-0.15	.	Pâle	N
39.	1903. Juin	9... 17.53	17.59	.	64.30	+0.15	Très court	Flou	n
40.	1906. Mai	9... 17.24.30	18.4	Vert	65	+0.24	Court	Bien coloré	N
41.	» Déc.	9... 11.52.30	18.25	.	64	-0.36	.	.	n
42.	» »	9... 11.54	18.25	{ Rouge Violet	64 66	-0.1 -1.17	Ampl. = 49°	Très brillant	N
43.	1908. Mars	10... 15.53	18.29	Jaune-vert.	64.30	-0.9	.	Brillant	N
44.	» Févr.	13... 14.57	18.30	Vert	65.3	+0.7	Demi-ampl. dr. = 18°	Brillant	T
45.	» »	13... 14.54.30	18.46	Vert	65.20	+0.11	.	Pâle	T
46.	» Mars	10... 15.50	18.52	.	65	+0.3	.	Bien coloré	N
47.	1906. Mai	9... 17.18	19.4	Vert	66	+0.36	Court	Assez coloré	N
48.	» Févr.	25... 15.18	19.10	.	65	-0.12	.	.	n

Mesures de la hauteur de l'arc circumzénithal au-dessus de l'horizon (suite).

N°.	Date.	Heure. h m s	Hauteur du Soleil. °	Couleur visée.	Hauteur du phénomène. °	Erreur. °	Amplitude de l'arc.	Coloration.	Instru- ment.
49.	1905. Août	5...	19.14	Jaune-verd.	65	-0.14	Mince	Pâle	n
50.	1908. Mai	20...	19.20	Rouge	65	+0.16	Court	Assez brillant, ni bleu, ni violet	N
51.	1907. Janv.	21...	19.25	Vert	68.15	+2.38			N
52.	1906. Mai	9...	19.37	Jaune-verd.	64.30	-0.53	Ampl. = 45° environ		n
53.	1905. Août	8...	19.44	Vert	66.30	+0.41			N
54.	1906. Mars	12...	19.46	.	66	+0.21	.		N
55.	1905. Juillet	4...	19.47	Rouge	64	-1.41	.	Très pâle	n
56.	1907. Oct.	24...	19.54	Violet	65.30	+0.22	.	Très brillant	n
57.	1906. Janv.	13...	19.56	.	65.30	+0.18	.	Pâle	N
58.	1907. Mai	15...	20.2	Vert	66	+0.10	.		n
59.	1905. Juillet	4...	20.5		65.30	+0.15	Ampl. = 45° environ	Assez brillant	T
60.	1907. Juin	11...	20.12		66	-0.27			n
61.	1908. Janv.	20...	20.20	Rouge	65.30	-0.41	.		N
62.	1907. Mai	9...	20.22	Vert	66	+0.24	.	Vague	N
63.	1905. Août	5...	20.25	Jaune	69	+2.27	.	Toutes les couleurs	N
64.	1908. Mars	10...	20.27	Rouge	66	-0.9	Très large		n
65.	1907. Juin	11...	20.55	Ext. rouge.	67	-0.39		Très brillant	N
66.	1905. Mai	19...	21.5	Jaune-verd.	67	+0.43	Court	Couleurs pures	N
67.	1908. Mars	10...	21.16	Violet	67.30	+0.50			N
68.	1907. Janv.	23...	21.27		68.30	+0.43	.	Vivement coloré	N
69.	1908. Mars	10...	21.41	Vert	66	-1.28	Court		n
70.	» Févr.	28...	21.50	Vert	67.30	+0.28		Pâle	N
					68	+0.29	.	Pâle	N
					68	+0.34	Court	Pâle	N
					67.45	-0.8	.	Pâle, coul. ass. pures	N

Mesures de la hauteur de l'arc circumzénithal au-dessus de l'horizon (suite et fin).

B. N°.	Date.	Heure.	Hauteur du Soleil.	Couleur visée.	Hauteur du phénomène.	Erreur.	Amplitude de l'arc.	Coloration.	Instrument.
		^h ^m ^s	[°] ['] ^{''}		[°] ['] ^{''}	[°] ['] ^{''}			
71.	1906. Oct.	21...	9.14	22.5	68	+0.11	Court	Brillant	N
72.	1907. Mai	31...	17.19	22.16	68	0.0		Extr. coloré	N
73.	1905. Avril	25...	16.40	22.38	69	+0.38			n
					68	+0.6			
74.	1907. Juin	14...	17.24	22.40	69	+0.27			N
					69.30	+0.38			
75.	1906. Févr.	3...	11.5	22.42	69	+0.33			n
76.	1907. Févr.	9...	10.39	22.48	69	-1.3	Court	Très pâle	N
77.	1908. Juin	13...	17.24	23.1	68.30	-0.16	Assez long	Pâle	N
78.	» Mars	9...	15.15	23.21	69.30	+0.21		Brill., toutes couleurs	N
					71	+0.12			
79.	1906. Oct.	29...	9.54	23.22	69	+0.35	Ampl. = 74°		N
80.	1907. Juin	11...	17.19	23.36	69	-0.25	Court	Coul. pures, mais pâles	N
81.	1908. Mars	9...	15.13	23.37	69	-0.11			N
82.	1907. Juin	9...	17.16.30	23.50	69.15	-0.11		Assez coloré	N
					69.30	+0.30		Pâle	N
83.	»	9...	17.13.30	24.19	72	+0.39	Court		N
84.	1906. Oct.	29...	10.15	24.55	71	+0.45			N
					73	+0.15			N
85.	1907. Févr.	9...	11.26.30	25.21	70.30	+0.15			N
86.	1903. Nov.	1...	10.53	25.55	71	-0.26		Pâle	n
87.	1906. Mars	12...	9.20	25.55	72	-0.15		Très brillant	n
					72	-0.15		Couleurs troubles	
					75	-0.17			
88.	» Oct.	29...	10.46	26.38	73.30	-0.10	Demi-ampl. dr. = 34°		N
					73	-0.7			
89.	1908. Févr.	13...	11.40	26.59	72	-0.27			N
90.	»	13...	11.55	27.18	74	+0.13	Court	Diffus	N
91.	»	13...	11.55.30	27.19	75	+0.44	Court		N
					74	-0.18			
							T, théodolite.		
							N, grand niveau;		
							n, petit niveau;		

Dans chaque groupe, sauf dans le deuxième, l'écart moyen est très petit, eu égard à l'ordre de précision des mesures.

Les résultats du premier et même du deuxième groupe confirment l'accroissement considérable de la distance de l'arc au Soleil à mesure que la hauteur de l'astre s'abaisse au-dessous de $22^{\circ}8'$.

La théorie de Bravais fait prévoir que cette distance s'accroît aussi lorsque le Soleil s'élève au-dessus de $22^{\circ}8'$. Cette prévision théorique si intéressante n'avait pu être contrôlée jusqu'à présent que d'une manière insuffisante, par l'observation unique de Wrede (1), en 1801, faite par hauteur solaire de $26^{\circ}20'$. Les six dernières mesures du Tableau précédent, qui constituent le cinquième groupe, apportent à ce sujet une confirmation nouvelle et apparemment définitive de la théorie de Bravais.

Les mesures du 13 février sont particulièrement concluantes; la partie supérieure du halo de 46° s'est montrée entre deux courtes apparitions de l'arc circumzénithal, alors que le Soleil était à une hauteur de Soleil de 27° . La différence de hauteur des deux courbes a pu ainsi être directement mise en lumière. On me permettra de reproduire en détail cette observation :

Heure.	Hauteur du Soleil.		Couleur visée.	Hauteur du phénomène.
h m s	^o ' "			^o
11.40	26.59	Arc circumz. diffus et court	Jaune-vert	74
11.42.30	27. 3	Arc réduit à sommet du H., vague	.	75
11.43	.	Plus rien	.	.
11.48	27.10	Sommet du H., color. vague	Plutôt le rouge	74
11.51	27.14	Partie supérieure du halo	.	73
11.52.30	27.16	Id.	.	73
11.55	27.18	Arc circumzénithal court	.	75
11.55.30	27.19	Arc circumzénithal	.	74
11.58	.	Plus rien	.	.

Dans le même temps, on a observé des arcs de halo de 22° courts et fugitifs; de $11^{\text{h}}38^{\text{m}}$ à $11^{\text{h}}40$, les deux parhélies se sont montrés avec éclat; à $11^{\text{h}}55^{\text{m}}$, on a vu reparaitre le parhélie de gauche rond et brillant. Le remplacement de l'arc circumzénithal par le halo de 46° a donc coïncidé avec la disparition des parhélies.

(1) D'après BRAVAIS, *Journal de l'École polytechnique*, 31^e Cahier, p. 101.

Horizontalité de l'arc. — J'ai pu la vérifier trois fois à l'aide du théodolite :

1° Le 9 mai 1907, à $17^h 12^m 30^s$. Hauteur du Soleil = $20^{\circ} 2'$. Amplitude de l'arc 45° environ. Pointé sur le vert;

2° Le 15 février 1908, à $14^h 57^m$. Hauteur du Soleil = $18^{\circ} 30'$. Demi-amplitude droite = 18° ;

3° L'horizontalité de l'arc résulte aussi des mesures faites le 15 janvier 1908 (n^{os} 23 et 20) sur un arc dont un cirrus isolé, en se déplaçant, a fait apparaître successivement les différentes parties.

A $14^h 20^m$, on en voyait la partie centrale (n^o 23); à $14^h 24^m 30^s$, le fragment visible était à 26° à gauche du Soleil en distance azimutale (n^o 20). Les deux hauteurs mesurées coïncident avec le résultat du calcul, la première à $+ 6'$ près, la deuxième à $+ 4'$ près.

Variation de la fréquence de l'arc suivant la hauteur du Soleil. — M. Ekama (1) a calculé l'intensité du faisceau lumineux qui sort après réfraction dans un prisme de glace de 90° , pour les diverses inclinaisons du faisceau incident. Il a trouvé les résultats suivants :

Hauteur du Soleil.	Intensité lumineuse.
0	0,000
5	0,282
10	0,351
15	0,362
20	0,349
25	0,292
30	0,147
31.52	0,000

On voit qu'il y a un maximum très accentué qui correspond à un angle d'incidence de 75° environ. L'arc circumzénithal devrait donc présenter un maximum d'éclat et par conséquent un maximum de fréquence pour une hauteur solaire de 15° . Notre statistique montre qu'il n'en est pas tout à fait ainsi : le maximum a lieu en réalité pour une hauteur de 20° environ.

J'attribue ce fait à ce que les axes des prismes ne gardent pas une verticalité absolue. Les petits balancements dont ils sont

(1) *Loc. cit.*, p. 62.

affectés troublent d'autant plus le phénomène et par suite tendent d'autant plus à l'effacer que les prismes sont plus éloignés de la position de déviation minimum, autrement dit que le Soleil est plus éloigné de la hauteur $22^{\circ}8'$.

Cet effet, en s'ajoutant à la variation étudiée par M. Ekama, produit un déplacement du maximum d'intensité et de fréquence de l'arc, qui n'a plus lieu pour une hauteur solaire de 15° , mais pour une hauteur plus rapprochée de $22^{\circ}8'$.

On doit, sans doute, attribuer aussi aux balancements des prismes le fait que nos mesures indiquent en moyenne pour la hauteur de l'arc une valeur trop faible, sauf lorsque la hauteur du Soleil est voisine de $22^{\circ}8'$. Bravais a montré, en effet, que les balancements tendent à faire descendre la courbe lumineuse (¹).

Forme des cristaux de glace qui produisent l'arc. — En résumé, la théorie qu'a donnée Bravais de l'arc circumzénithal est entièrement satisfaisante à tous les points de vue. Il reste seulement à montrer qu'il existe une forme de cristaux de glace remplissant toutes les conditions requises par cette théorie.

A priori, les prismes courts paraissent dans ce cas, mais nous avons vu qu'ils ne peuvent pas donner les parhélies. Or, on constate entre l'apparition de ceux-ci et celle de l'arc circumzénithal une connexion si constante, qu'on ne peut douter que les deux phénomènes soient dus aux mêmes cristaux, du moins presque toujours. On est donc conduit à attribuer l'arc circumzénithal aux prismes terminés par une ou deux lamelles, mais surtout à la forme de la figure 8, la plus propre à tomber verticalement sans balancements sensibles.

Arc tangent inférieur du halo de $46''$ ou arc circumhorizontal.

On l'explique de la même manière que l'arc circumzénithal, mais, dans le cas actuel, la lumière, au lieu de pénétrer dans le prisme par la base supérieure pour sortir par une face latérale, va de l'une de ces faces à la base inférieure.

Ici encore, deux théories sont en présence : celle de Galle,

(¹) *Journal de l'École polytechnique*, 31^e Cahier, p. 98.

d'après laquelle les prismes que leurs balancements autour d'une arête horizontale amènent dans la position de déviation minimum sont seuls aptes à produire le phénomène et celle de Bravais qui le considère comme engendré par des prismes dont l'axe reste vertical.

Pernter, dans son Ouvrage, adopte la théorie de Galle, pour cet arc comme pour l'arc supérieur, et pour la même raison ⁽¹⁾.

L'objection fondamentale que j'ai présentée à cette manière de voir, relativement à l'arc circumzénithal, s'applique également à l'arc circumhorizontal.

La théorie de Bravais, au contraire, rend aussi bien compte de celui-ci que de celui-là.

Il reste toutefois à expliquer l'extrême rareté de l'arc circumhorizontal. On ne peut le voir, il est vrai, que par hauteurs de Soleil supérieures à 46° (et même 58° dans la théorie de Bravais), mais cette condition se trouve réalisée, aux alentours de midi, tous les jours dans la région équatoriale et à Paris du 11 mai au 1^{er} août. D'autre part, la position de l'arc, peu haut dans le ciel et suffisamment loin du Soleil, le rend propre à être facilement aperçu, même des personnes qui ne prêtent pas à cet ordre de phénomènes une attention spéciale. Or on n'en connaît que trois observations, celle de Weber ⁽²⁾ en 1815, celle de Heiden ⁽³⁾ en 1839 et celle de F. Odenbach ⁽⁴⁾ en 1901. Pendant nos dix années d'observations à Montsouris, nous ne l'avons pas vu une seule fois, bien que nous ayons surveillé son apparition dans toutes les occasions favorables.

Il semble cependant qu'on doive rattacher à ce phénomène deux taches colorées vues par M. Dutheil le 15 juin 1908 à midi 12, sur deux petits cirrus isolés. Ayant mesuré, à l'aide de la herse et du grand niveau, les coordonnées de ces taches, M. Dutheil a trouvé :

	Distance azimutale au Soleil.	Hauteur.
Pour la première.....	8° à droite	19°
Pour la deuxième.....	24°	$18^{\circ}30'$

(1) *Meteorol. Optik*, p. 368.

(2) *Gilbert's Annalen*, t. L, p. 217.

(3) *Poggendorff's Annalen*, t. LVI, p. 633.

(4) *Monthly weather Review*, 1901, p. 566.

La hauteur du Soleil était de $64^{\circ}23'$. J'ai calculé quelle aurait dû être, d'après leurs azimuts, la hauteur de chacune des taches, selon qu'elles auraient appartenu au halo de $45^{\circ}44'$ de rayon ou à l'arc circumhorizontal de Bravais. J'ai obtenu dans le cas du halo $19^{\circ}36'$ pour la première et $21^{\circ}28'$ pour la deuxième et dans le cas de l'arc circumhorizontal $18^{\circ}9'$ pour les deux.

Pour que la deuxième tache pût être considérée comme faisant partie du grand halo, il faudrait qu'il y eût une erreur de près de 3° sur la hauteur, ce qui est inadmissible, tandis qu'une erreur de 1° pour la hauteur de la première reste dans les limites du possible. Il est donc probable que les deux taches étaient des fragments du cercle circumhorizontal.

Quoi qu'il en soit, ce phénomène est des plus rares; il l'est certainement cent fois plus que l'arc circumzénithal. Cette rareté s'explique si l'on remarque que la glace lamellaire, qui ne paraît pas propre à donner l'arc circumzénithal, ne doit pas concourir davantage à la formation de l'arc circumhorizontal et que, des trois formes prismatiques à axe vertical (*fig.* 6, 7 et 8), celle qui paraît jouer le rôle principal (*fig.* 8) ne peut engendrer cet arc puisqu'elle n'a pas de base inférieure. Au surplus, dans les deux autres formes (*fig.* 6 et 7) l'interposition de la lamelle supérieure sur le trajet des rayons lumineux est des plus défavorables.

Arcs tangents infralatéraux du halo de 46° .

Ces arcs sont colorés, larges et de faible courbure, aussi plusieurs observateurs les ont-ils comparés à des fragments d'arc-en-ciel.

Bravais ⁽¹⁾ les explique par la réfraction dans les angles dièdres de 90° des prismes à axe horizontal, la lumière entrant par une base et sortant par une face latérale. A chaque point de fuite des axes (entre certaines limites) correspond un arc de cercle coloré dont le mode de production est identique à celui de l'arc circumzénithal. L'arc tangent infralatéral est l'enveloppe de tous ces arcs élémentaires.

Pernter, posant en principe, dans son *Optique météorologique*,

(1) *Journal de l'École polytechnique*, 31^e Cahier, p. 113.

que seuls des prismes au minimum de déviation sont susceptibles de donner naissance au phénomène des halos, a rejeté encore pour celui-ci, comme pour les deux précédents, la théorie de Bravais. Il voit dans les arcs infralatéraux les arcs de Lowitz des parhélies de 46° ⁽¹⁾.

A cette manière de voir, j'objecterai tout d'abord l'observation faite en 1906, par Willsea ⁽²⁾ qui a vu en même temps les deux arcs infralatéraux et un parhélie de 46° . Son dessin montre ce parhélie fort écarté de l'arc correspondant.

Au point de vue théorique, je ferai remarquer que, pour expliquer des arcs aussi longs que le sont généralement les arcs infralatéraux, il faudrait supposer des balancements d'une telle amplitude qu'ils équivaldraient à l'absence totale d'orientation.

De plus, si l'on se reporte à ce que j'ai dit au sujet des arcs de Lowitz, on verra que la lumière se disperserait sur une aire en éventail de grande étendue et cesserait d'être perceptible. Pernter réduit arbitrairement cette aire à une courbe, mais cette courbe elle-même présente une forme très éloignée de celle des arcs qu'il s'agit d'expliquer.

D'ailleurs, il n'y a aucune raison d'écarter la théorie de Bravais, du moment que l'efficacité par simple dispersion conique est confirmée péremptoirement par l'étude de l'arc circumzénithal.

Voici une mesure que j'ai pu prendre récemment sur un arc infralatéral. C'est, à ma connaissance, la première qu'on ait faite : le 23 avril 1908, à 11^h 19^m, j'ai vu l'arc de gauche, très pâle, presque rectiligne, mais avec une légère courbure convexe du côté du Soleil et incliné d'environ 45° sur l'horizon d'après un croquis assez grossier exécuté séance tenante. J'ai mesuré au grand niveau la hauteur angulaire du point le plus brillant que j'ai trouvée de 19° . Le Soleil était à 53° . Le grand halo n'était pas visible. Trois minutes après, le halo de $22''$ et le halo circonscrit se sont montrés complets mais à peine marqués.

Suivant la théorie de Bravais, le point le plus brillant de l'arc est son point de tangence avec le grand halo. La hauteur h de ce point est donnée en fonction de la hauteur H du Soleil par la

(¹) *Meteorologische Optik*, p. 359.

(²) *Monthly weather Review*, mars 1906, p. 123.

formule

$$\sin h = \sin H \cot 67^{\circ} 52'.$$

Si l'on fait dans cette formule $H = 53^{\circ}$, on obtient $h = 18^{\circ} 57'$. L'accord avec l'observation est aussi complet que possible.

Les arcs infralatéraux sont attribuables aux mêmes cristaux de glace que les arcs tangents au halo de 22° , mais on conçoit aisément que les premiers soient incomparablement plus rares que les seconds.

Tout d'abord, comme l'a montré Bravais, un petit nombre des prismes seulement concourent à produire le phénomène (car la distance du Soleil au point de fuite des axes doit être comprise entre 60° et 78°). En second lieu, si les prismes sont hémimorphes, ce qui paraît être le cas ordinaire, une seule de leurs extrémités est efficace. Enfin, dans nos climats, le phénomène ne peut guère se montrer que près de l'horizon et doit plus d'une fois être caché par la brume.

Arcs tangents supralatéraux du halo de 46° .

Bravais ⁽¹⁾ nomme ainsi des arcs dont il a montré théoriquement la possibilité mais qui n'ont pas encore été observés avec certitude. Ils prendraient naissance dans des prismes à axe horizontal, ainsi que les arcs infralatéraux, mais la lumière entrerait dans le cas actuel par une face latérale et sortirait par une base.

Lorsque la hauteur du Soleil H est inférieure à 12° , ils consistent en deux arcs séparés, tournant leur concavité vers le Soleil et tangents au halo de 46° dont ils s'écartent peu. Pour $H = 12^{\circ}$, ces deux arcs se soudent et forment une courbe unique que Bravais appelle l'*arc bitangent supérieur*. Quand H croît de 12° à $22^{\circ} 8'$, les deux points de tangence se rapprochent du sommet du halo. Pour $H = 22^{\circ} 8'$, l'arc se confond pratiquement avec le tiers supérieur du halo. Pour des valeurs plus grandes de H , il a la forme d'un arc de cercle tangent à l'arc circumzénithal.

Je crois que nous avons vu deux fois ce phénomène :

1^o Le 18 septembre 1905 (voir *Annales de l'Observatoire municipal*, t. VI, p. 471);

(1) *Journal de l'École polytechnique*, 31^e Cahier, p. 121.

2° Le 10 janvier 1907 dans les circonstances suivantes :

Vers midi, on voyait par intermittences l'arc tangent supérieur du halo de 22° , fortement coloré, et aussi, en haut et à gauche un arc d'environ 90° de longueur, de couleurs très pures, à environ 46° du Soleil. Maximum de coloration à 53° de hauteur. Ce dernier phénomène, visible sur le bleu du ciel dans sa plus grande longueur, montrait toutes les couleurs du spectre. Il a été bientôt caché par des alto-cumulus. Hauteur du Soleil à midi $= 19^\circ 30'$ (observation faite par M. Dutheil).

Dans les deux cas, les phénomènes concomitants indiquaient la prédominance des prismes à axe horizontal. En outre, dans le second cas, la hauteur du maximum de coloration différerait peu de celle qu'indique le calcul pour l'arc tangent supralatéral. Cette hauteur h , qui est celle du point de tangence de l'arc et du halo, est donnée, en fonction de la hauteur du Soleil H , par la formule

$$\sin h = \sin H \tan 67^\circ 52'.$$

Pour $H = 19^\circ 30'$, on a $h = 55^\circ$.

Halo de 22° .

Ce phénomène s'explique très simplement en partant de l'hypothèse de prismes de 60° sans orientation mais on se dispense généralement d'expliquer cette absence d'orientation, ce qui est pourtant nécessaire.

La plupart des formes *régulières* de cristaux de glace s'orientent d'une manière déterminée pendant la chute, mais les cristaux bien réguliers sont l'exception et ceux même qui ont été tels à un certain instant se dégradent bientôt par évaporation ou par fusion. Leur forme devient de plus en plus sphéroïdale et leur orientation de moins en moins nette.

La formation de givre à la surface des cristaux ⁽¹⁾ doit aussi contribuer à détruire l'équilibre, soit en déplaçant le centre de gravité, soit en arrondissant le contour du cristal.

Au cours de la dégradation progressive du cristal, quelle qu'en

(¹) Voir DOBROWOLSKI, *Loc. cit.*, p. 46 et suivantes.

soit la cause, c'est certainement l'angle dièdre de 60° , si commun dans la glace, qui disparaît le dernier. Aussi voit-on ordinairement, à la fin d'un halo remarquable, le cercle de 22° succéder ou survivre aux autres phénomènes lumineux.

Il est rare au contraire de voir un halo ordinaire, de coloration uniforme sur tout son contour, se compliquer dans la suite, même s'il est brillant, à moins que les nuages qui le produisent ne viennent à être remplacés par d'autres, d'aspect différent.

Halo de 46° .

On ne voit, 70 fois sur 100, que la partie supérieure de ce halo. Dans 8 autres cas sur 100, nous en avons observé un arc latéral, vers un des points où le halo aurait été touché par un arc tangent soit infra, soit supralatéral.

L'apparition de ce halo est fort loin d'être indépendante de la hauteur du Soleil comme le croyait Bravais ⁽¹⁾. On en jugera d'après les résultats de notre statistique de 10 ans :

Nombre de fois que le halo de 46° a été observé aux différentes hauteurs du Soleil.

	Hauteur du Soleil.								
	0°-4°.	5°-9°.	10°-14°.	15°-19°.	20°-24°.	25°-29°.	30°-44°.	45°-59°.	> 59°.
Nombre de cas. . . .	1	5	12	34	22	17	5	1	1

Cette variation de fréquence du grand halo avec la hauteur du Soleil et le fait qu'on n'en voit le plus souvent que la partie supérieure démontrent que les axes des prismes de glace qui le produisent tendent vers la verticalité.

Il n'est guère possible de l'attribuer aux formes ordinaires de la glace lamellaire car leur fréquence est si prédominante que le grand halo devrait, dans ce cas, se montrer plus souvent. Il doit être plutôt engendré par des formes prismatiques voisines de celles qui donnent l'arc circumzénithal mais présentant un équilibre

⁽¹⁾ *Journal de l'École polytechnique*, 31^e Cahier, p. 90.

moins stable, soit en raison de leurs proportions, soit par suite de défauts dans la formation ou d'altération ultérieure.

Les prismes qui oscillent fortement autour de l'horizontale doivent, souvent aussi, contribuer à la production du phénomène dont ils renforcent la partie supérieure lorsque le Soleil est à une hauteur voisine de 22° ou un peu inférieure et certaines parties latérales pour d'autres hauteurs de l'astre.

Rayon du grand halo. — Nous avons effectué, du 23 septembre 1905 au 4 avril 1908, 30 mesures du rayon vertical supérieur, sur 20 grands halos différents. Nous avons toujours visé le jaune-verdâtre. Il serait trop long de reproduire ici tous les nombres obtenus. Ils varient entre 44° et $47^\circ 30'$. J'inclinerais à penser que les écarts relativement considérables qu'ils présentent entre eux ne sont pas dus simplement à des erreurs d'observation mais que le rayon du grand halo pourrait bien n'être pas invariable.

La moyenne est de $45^\circ 59'$, elle diffère assez peu de la valeur théorique $45^\circ 44'$.

L'anthélie, les paranthélies et les halos blancs.

Je rappellerai d'abord les explications qui ont été données de ces phénomènes, en indiquant les raisons pour lesquelles elles me paraissent devoir être rejetées. J'exposerai ensuite la théorie que je propose de leur substituer.

ANTHÉLIE.

Pour rendre compte de l'anthélie, Bravais ⁽¹⁾ suppose que les cristaux de glace en tablettes hexagonales minces se tiennent de champ, une de leurs pointes dirigée vers le bas. On a alors des angles dièdres de 90° à arête verticale, qui peuvent fournir, par

(1) *Journal de l'École polytechnique*, 31^e Cahier, p. 151.

double réflexion intérieure, une image blanche du Soleil, précisément à la place de l'anthélie (*fig. 11*).

Fig. 11.

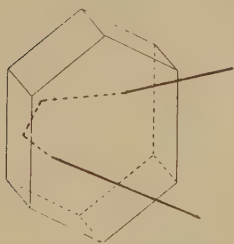
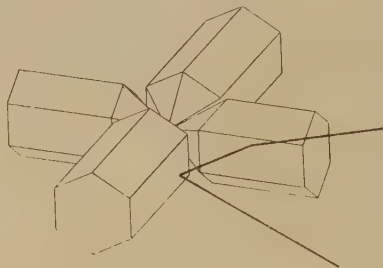


Fig. 12.



Cette théorie est inacceptable, parce que les prismes courts s'orientent à plat et non de champ.

PARANTHÉLIES DE 120° .

Ils ont reçu différentes explications, toutes fondées sur une double réflexion à l'intérieur ou à l'extérieur de prismes allongés

Fig. 13.

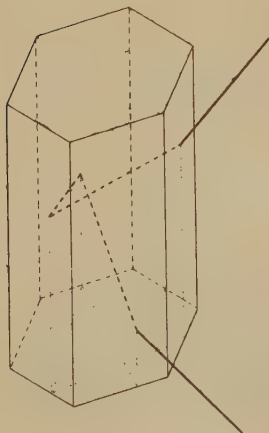
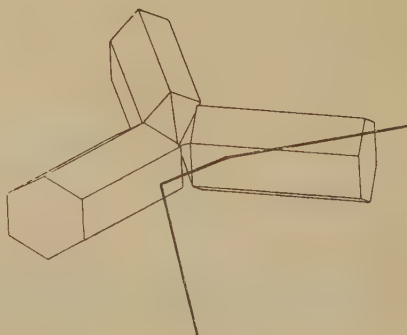


Fig. 14.



se tenant verticalement. Je citerai en particulier celle de Mascart, adoptée par Pernter (*fig. 13*).

Mais comme ces prismes, lorsqu'ils ne sont pas couronnés d'une lamelle, se tiennent horizontalement, donnant alors des arcs tangents au halo de 22° et ceux qui touchent latéralement le halo de 46° , on devrait voir quelquefois apparaître, en même temps que ces phénomènes, un arc blanc qui aurait son sommet à 120° du Soleil dans le vertical de l'astre et qui serait aux paranthélies ce que les arcs tangents au halo de 22° sont aux parhélies. Rien de semblable n'a jamais été observé.

Dans d'autres cas, les prismes peuvent avoir une orientation indifférente (halos de 22° et 46°). Il devrait donc exister aussi un halo de 120° , on n'en a jamais vu trace.

HALO D'HEVELIUS ET PARANTHÉLIES DE 90° .

Le halo d'Hevelius est un cercle blanc qui a le Soleil pour centre et dont le rayon a été estimé à 90° , mais n'a jamais été mesuré. C'est un phénomène très rare qui, observé pour la première fois par l'astronome Hevelius en 1661 ⁽¹⁾, n'a été revu que 5 ou 6 fois depuis.

Au point de rencontre de ce cercle et du cercle parhélique, on a vu des paranthélies qui peuvent se montrer sans le halo. Nous en avons observé un le 5 avril 1899 ⁽²⁾.

Bravais a envisagé diverses manières d'expliquer ce halo et les paranthélies correspondants mais sans en trouver aucune qui le satisfît ⁽³⁾.

Dans son *Optique météorologique* ⁽⁴⁾, Pernter en propose deux :

Suivant la première, qui a été imaginée par Young, le phénomène serait dû à de simples prismes hexagonaux. La lumière, entrant par une face latérale, ressortirait par la même face après avoir subi deux réflexions intérieures, comme l'indique la figure 15. Dans ces conditions, il y a un minimum de déviation, qui donne une image colorée à $98^\circ 20'$ du Soleil. Si les prismes sont orientés

⁽¹⁾ *Mercurius in sole visus*... , p. 171-176.

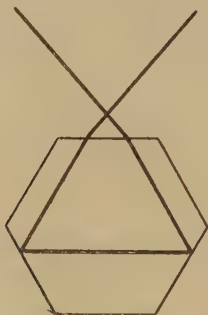
⁽²⁾ *Annuaire de la Soc. météor. de France*, 1899, p. 140.

⁽³⁾ *Journal de l'École polytechnique*, 31^e Cahier, p. 143.

⁽⁴⁾ P. 390.

d'une manière quelconque, on a un cercle de $98^{\circ}20'$ de rayon. Si leurs axes sont verticaux, on a des paranthélies. Mais, lorsque leurs axes sont horizontaux, pourquoi ne voit-on jamais l'arc situé

Fig. 15.



à $98^{\circ}20'$ dans le vertical solaire, que la même théorie fait prévoir ?

En outre, cette théorie a l'inconvénient de fournir un cercle et des paranthélies colorés alors que ceux-ci et celui-là ont toujours été vus blancs.

En particulier, le paranthélie de 90° que j'ai observé le 5 avril 1899 était absolument incolore et offrait la même teinte laiteuse que l'anthélie et les paranthélies de 120° .

Pernter indique une autre explication possible du halo d'Hevelius, mais elle ne peut pas rendre compte des paranthélies correspondants et il la juge lui-même peu vraisemblable. Je n'y insisterai donc pas.

LE PSEUDO ARC-EN-CIEL BLANC.

On a observé à différentes reprises un arc de cercle blanc, occupant dans le ciel à peu près la même position que l'arc-en-ciel mais dont l'origine est certainement toute différente.

C'est Pernter qui a attiré l'attention sur ce point et a montré qu'il existe un phénomène de halo particulier qu'on ne doit pas confondre avec la forme dégénéréscente de l'arc-en-ciel connue sous le nom d'*arc-en-ciel blanc* ⁽¹⁾. Il a appelé ce phénomène

(¹) *Erklärung des fälschlich weisser Regenbogen* (*Sitzungsberichten der K. Akademied er Wissensch. in Wien : Math. naturw. Klasse*, Bd. CXIV, Juli 1905).

halo de Bouguer, à tort peut-être, car le cercle blanc dont parle Bouguer n'était évidemment autre que le cercle décrit par son compagnon de voyage Ulloa et paraît avoir été plutôt un véritable arc-en-ciel blanc ⁽¹⁾.

C'est aussi sans raison suffisante, selon moi, que Pernter considère comme dus à des cristaux de glace tous les arcs-en-ciel blancs observés soit sur les montagnes, soit dans les régions polaires, au sein de nuages ou de brouillards où la température était au-dessous de zéro. Il est bien connu que les gouttelettes d'eau peuvent rester à l'état de surfusion dans l'air jusqu'à une température très basse. Elles peuvent même coexister avec des particules glacées, dans le même nuage.

Toutefois, il est deux observations d'arcs-en-ciel blancs qui se rapportent sans aucun doute à un phénomène de halo :

1° Celle d'Arctowski, dans laquelle l'arc-en-ciel blanc était

Fig. 16.

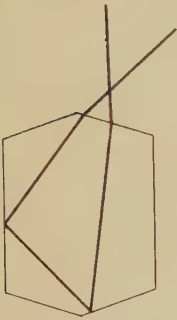
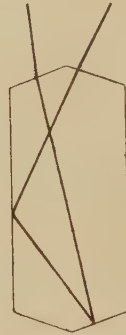


Fig. 17.



Fig. 18.



accompagné de deux autres arcs de même hauteur dans des azimuts perpendiculaires.

Évidemment ces deux-ci n'avaient rien de commun avec l'arc-en-ciel et tous trois étaient de nature identique ; on voyait en même temps le halo de 22°, les parhélies et l'arc circumzénithal ⁽²⁾.

⁽¹⁾ *Hellmann Neudrucke* n° 14.

⁽²⁾ *Résultats du voyage du S. Y. Belgica*. — ARCTOWSKI, *Phénomènes optiques*, p. 40.

2° Celle d'un arc qui a été observé le 2 février 1908 sur un grand nombre de points de l'Angleterre et qui se produisait dans des cirrus, par temps clair ⁽¹⁾.

Pernter ⁽²⁾ explique le pseudo arc-en-ciel blanc par une double réflexion à l'intérieur de prismes hexagonaux, terminés par des pyramides dont les faces ont une inclinaison convenable. Il en indique trois types possibles (*fig.* 16, 17, 18).

Mais d'abord, ces prismes, étant allongés, se tiendraient horizontalement et non d'une manière quelconque comme la théorie l'exige. En second lieu une des réflexions se ferait sous une incidence très faible, pour laquelle la quantité de lumière réfléchie serait presque nulle.

NOUVELLE THÉORIE DE L'ANTHÉLIE, DES PARANTHÉLIES ET DES DEUX HALOS BLANCS.

J'ai fait connaître, l'an dernier, une nouvelle théorie de ces phénomènes ⁽³⁾, que j'attribue tous à une double réflexion extérieure sur des cristaux de glace formés de plusieurs prismes soudés ensemble. Je crois utile de préciser ici certains points de cette théorie sur lesquels je n'ai pu m'expliquer suffisamment, faute de place, dans ma Note des *Comptes rendus*.

Elle m'a été suggérée par la lecture du beau Mémoire de M. Dobrowolski, *La Neige et le Givre* ⁽⁴⁾, qui renferme, particulièrement en ce qui concerne les formes prismatiques, un très grand nombre de notions nouvelles.

D'après M. Dobrowolski, les prismes de glace hémimorphes, c'est-à-dire terminés en pyramide à une de leurs extrémités seulement, forment très fréquemment des agrégats radiaires, en se soudant par leurs pointes.

Anthélie. — « J'ai observé assez souvent, dit-il, des étoiles à quatre rayons représentés par quatre prismes maclés dans un

⁽¹⁾ *Symons's meteorological Magazine*, february 1908.

⁽²⁾ *Meteorolog. Optik*, p. 395.

⁽³⁾ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXLIV, 1907, p. 1190.

⁽⁴⁾ *Résultats du voyage du S. Y. Belgica*, Anvers, 1903.

même plan et formant entre eux l'angle de 90° , ou une sorte de double étoile formée autour de deux centres situés dans un même plan et sur une même droite » (*loc. cit.*, p. 32).

M. Dobrowolski n'a pas noté quelle était l'orientation relative des prismes autour de leur axe dans ces assemblages. Il est naturel de penser qu'ils tournaient l'un vers l'autre soit une face, soit une arête. Admettons qu'au moins dans certains cas les faces se frottent vis-à-vis. Nous avons vu qu'un assemblage quelconque de prismes dans un même plan s'oriente horizontalement en tombant. Les étoiles et les doubles étoiles décrites par M. Dobrowolski présentent donc, pendant leur chute, des faces verticales perpendiculaires entre elles et propres à donner l'anthélie par double réflexion extérieure (*fig. 12*).

Paranthélies de 120° . — La figure 20 J de l'Ouvrage de M. Dobrowolski montre un assemblage de trois prismes dans un même plan et faisant entre eux des angles égaux. Si ces trois prismes tournent l'un vers l'autre une face latérale, ils réalisent des miroirs verticaux à 120° qui donneront les paranthélies de 120° (*fig. 14*).

La figure 20 B^v du même Ouvrage fait voir un assemblage de trois prismes dont deux sont dans le prolongement l'un de l'autre, le troisième paraissant faire avec ceux-ci des angles de 60° et de 120° . Un tel assemblage peut encore donner les paranthélies de 120° .

Les deux halos blancs. — Les prismes peuvent aussi se grouper dans des plans différents. Ainsi la figure 20 Aⁱⁱⁱ de l'Ouvrage précité représente un assemblage composé de six prismes tous perpendiculaires entre eux ⁽¹⁾.

Ce n'est pas le seul que puissent réaliser les prismes dans l'espace à trois dimensions, car M. Dobrowolski a observé jusqu'à 7 prismes disposés dans des plans différents autour d'un même point central (*loc. cit.*, p. 32).

Quelle peut être la loi générale déterminant tous les types possibles de ces assemblages? On pourrait supposer que les prismes

(1) Cet assemblage a été vu aussi par M. Westmann au Spitzberg, d'après la *Revue néphologique*, août 1906, p. 63.

se soudent par les faces ou par les arêtes de leurs troncatures pyramidales, mais cette hypothèse est difficilement conciliable avec l'existence constatée des assemblages plans de 3 et de 4 prismes dont j'ai parlé plus haut.

Qu'on suppose, dans ces assemblages, les prismes soudés par les faces ou par les arêtes des troncatures, on en déduira, dans les deux cas, pour ces troncatures, des angles dont les tangentes ont pour rapport des nombres incommensurables, ce qui est contraire aux lois cristallographiques.

Ces lois seraient à la vérité satisfaites s'il y avait soudure par les arêtes dans l'un de ces deux assemblages et soudure par les faces dans l'autre, mais l'inclinaison des faces sur l'axe ne s'accorderait pas avec l'angle fondamental de $54^{\circ}44'$ admis pour la glace.

Enfin si, dans l'assemblage de quatre prismes en croix les arêtes de deux d'entre eux étaient en contact avec les faces des deux autres, il en résulterait encore des inclinaisons incompatibles avec celles que comporte l'assemblage de trois prismes.

Une autre hypothèse consiste à admettre que, lorsqu'ils s'assemblent dans toutes les directions autour d'un point, les prismes forment toujours entre eux des angles égaux. Dans ces conditions, les assemblages non plans géométriquement possibles seraient au nombre de cinq et correspondraient aux cinq polyèdres réguliers. J'appellerai *assemblage hexaédrique*, par exemple, l'union de six prismes dirigés vers les centres des faces de l'hexaèdre régulier ou cube. Cet assemblage existe, ainsi qu'on l'a vu plus haut.

Au tétraèdre, à l'octaèdre et à l'icosaèdre correspondraient des assemblages de 4, 8 et 20 prismes, dans lesquels deux prismes voisins quelconques peuvent tourner exactement l'un vers l'autre une face ou une arête.

L'existence de l'assemblage dodécaédrique est inadmissible, car chaque prisme y serait entouré de cinq autres équidistants, ce qui ne comporte pour lui aucune orientation compatible avec la symétrie hexagonale du prisme de glace.

Dans leur chute, ainsi que je l'ai déjà fait remarquer, les corps de cette sorte n'ont pas d'orientation déterminée.

En admettant que ce sont les faces qui se font vis-à-vis, ces assemblages réalisent des miroirs doubles orientés d'une manière quelconque et dont les plans réfléchissants sont des rectangles

très allongés. On reconnaît par le raisonnement et j'ai vérifié expérimentalement que la double réflexion donne dans ces conditions, un maximum de lumière très accentué dans le plan normal aux deux faces réfléchissantes, à une distance angulaire de la source lumineuse égale au double de l'angle aigu α que font entre eux les plans des miroirs.

Il en résulte qu'une nuée de pareils cristaux de glace donne un halo blanc, de rayon 2α , à bord extérieur bien tranché et à bord intérieur un peu dégradé.

Voyons maintenant quelles valeurs de l'angle α fournissent les quatre types d'assemblages que nous avons été amenés à considérer comme seuls possibles.

L'assemblage tétraédrique (*fig. 19*) présente des miroirs doubles à $109^{\circ}28'$, qu'on retrouve dans l'octaédrique (*fig. 20*)

Fig. 19.

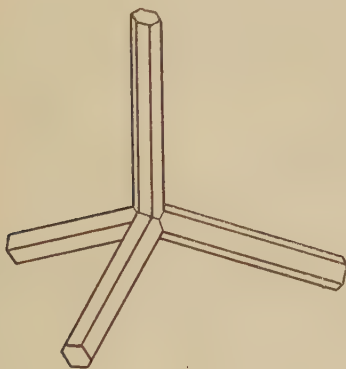
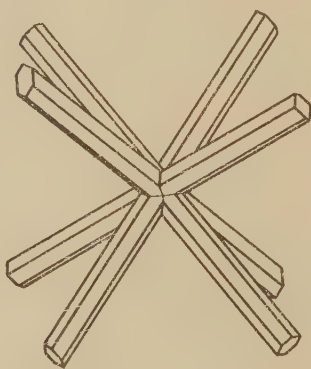


Fig. 20.



avec d'autres à $70^{\circ}32'$ (l'angle supplémentaire). L'assemblage icosaédrique (*fig. 21*) offre des miroirs doubles à $41^{\circ}48'$.

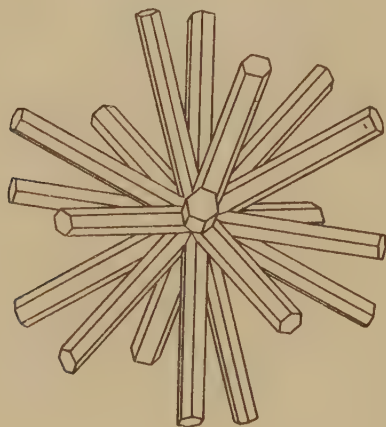
En laissant de côté l'assemblage hexaédrique, dont l'angle de 90° donnerait une image du Soleil au point du ciel diamétralement opposé à l'astre, phénomène qui ne pourrait être observé qu'en ballon ou sur une montagne abrupte, on est donc conduit à prévoir deux halos blancs, qui auraient respectivement des rayons de $2 \times 70^{\circ}32' = 141^{\circ}4'$ ou $38^{\circ}56'$ autour du point opposé au Soleil et $2 \times 41^{\circ}48' = 83^{\circ}36'$.

Pour le rayon du halo d'Hevelius, la valeur $83^{\circ}36'$ paraît un peu faible mais est parfaitement admissible.

Quant au pseudo arc-en-ciel blanc, l'observation de M. Arctowski lui assigne, d'après Pernter ⁽¹⁾ un rayon de $38^{\circ}56'$, en parfaite concordance avec la théorie.

On pourrait encore obtenir une autre valeur pour le rayon du pseudo arc-en-ciel blanc en supposant que, dans l'assemblage ico-

Fig. 11.



saédrique, chaque prisme tourne vers les trois plus proches, non une face, mais une arête. Il tournerait alors, à $7^{\circ}46'$ près, une face vers six autres, éloignés de $70^{\circ}32'$, ce qui fournirait des miroirs de 72° d'ouverture, et par suite un halo blanc de 144° ou de 36° autour du point opposé au Soleil.

La même hypothèse, appliquée aux autres assemblages, ne permet de prévoir aucun phénomène optique, en raison de ce que les faces sont alors trop inclinées l'une par rapport à l'autre.

Paranthélies extraordinaires. — Les assemblages polyédriques de prismes ne sauraient être toujours complets. Ils doivent se réduire fréquemment à deux prismes faisant entre eux l'angle α

⁽¹⁾ *Meteorologische Optik*, p. 394.

caractéristique de l'assemblage. Cette sorte de doublet s'oriente, comme on sait, horizontalement. Il donne des images blanches du Soleil à la même hauteur que cet astre et à une distance azimutale 2α . Telle est, selon moi, l'origine des paranthélies qui correspondent au halo d'Hevelius et de ceux qui, d'après certains dessins de halos, paraissent s'être quelquefois montrés à environ 40° de l'anthélie.

En résumé, divers assemblages de prismes dans un même plan, dont l'existence est certaine, fournissent une explication très simple de l'anthélie et des paranthélies de 120° et il est naturel d'attribuer à des assemblages de même nature, mais d'angles différents, les paranthélies extraordinaires.

L'observation a montré que les prismes s'assemblent parfois dans des plans différents. Ils doivent alors donner des halos blancs. On a vu des assemblages de six prismes figurant les axes quaternaires de l'hexaèdre régulier. Si l'on admet la possibilité d'assemblages analogues figurant les axes ternaires de l'icosaèdre et ceux du tétraèdre ou de l'octaèdre, on rend compte d'une manière satisfaisante du halo d'Hevelius et du pseudo arc-en-ciel blanc.

A cette théorie on a fait l'objection suivante : « Ces formes de cristaux de glace s'observent très rarement. Il est donc peu probable qu'elles puissent jamais exister dans une nuée en nombre suffisamment grand pour produire un phénomène lumineux. » Qu'on me permette de répondre par une comparaison : dans certaines années, les chenilles sont assez nombreuses pour dénuder des forêts. Dans d'autres années, il faudrait chercher longtemps pour en trouver une seule.

Or il en est des formes cristallines comme des espèces animales. Si les conditions viennent à être particulièrement favorables, pourquoi tel type de cristal, habituellement rare, ne se multiplierait-il pas en abondance ? Les observations faites jusqu'à présent sur les cristaux de glace atmosphériques sont en bien petit nombre. Presque toutes ont été effectuées à la surface du sol. On ne sait rien ou à peu près rien sur les cristaux des couches élevées de l'atmosphère. Dans ces conditions, ce qui est étonnant, c'est qu'on ait déjà rencontré des spécimens de la forme qui donne naissance à un phénomène aussi rare que l'anthélie.

ARCS OBLIQUES DE L'ANTHÉLIE.

Bravais ⁽¹⁾ attribue ces arcs à la dispersion de la lumière par les stries d'accroissement qui peuvent accidentellement recouvrir les faces des cristaux de glace.

Cette explication s'adapte facilement à la théorie de l'anthélie exposée ci-dessus. Il suffit d'admettre l'existence de stries d'accroissement obliques sur les faces latérales des prismes réunis en croix.

PARHÉLIES DE 46".

Ainsi que Brandes ⁽²⁾ l'a fait remarquer le premier, ces parhélies peuvent s'expliquer de la même manière que les parhélies ordinaires de 22° en admettant l'existence de prismes optiques de 90° à arête verticale.

La difficulté était de trouver une orientation stable des axes qui rende verticales les arêtes des angles dièdres de 90° des prismes hexagonaux. Cette orientation ne se présente pas dans le cas des lamelles comme on le croyait, mais elle se trouve réalisée dans un assemblage de deux prismes formant entre eux un angle quelconque différent de 180°.

D'après Bravais ⁽³⁾, les parhélies de 46° seraient plutôt les parhélies secondaires des parhélies de 22°. Dans cette hypothèse, ces parhélies seraient plus près du Soleil et s'en écarteraient moins vite pour des hauteurs croissantes de l'astre, que s'ils étaient dus à des prismes de 90°.

Nous avons observé une seule fois un parhélie de 46°, le 22 juin 1900. J'ai fait avec le petit théodolite quatre mesures de la distance azimutale de ce parhélie au Soleil. J'ai trouvé 46° 17' en moyenne, le Soleil étant à 2° 46' au-dessus de l'horizon. Cette mesure est beaucoup plus favorable à l'hypothèse d'une réfraction dans des prismes de 90° qu'à celle de deux réfractions successives

(1) *Journal de l'École polytechnique*, 31^e cahier, p. 199.

(2) *Gehler's Neues Wörterbuch*, t. V, p. 487.

(3) *Journal de l'École polytechnique*, 31^e cahier, p. 145.

dans des prismes de 60° car, dans le premier cas, on aurait dû avoir $45^\circ 51'$ et dans l'autre $43^\circ 44'$.

COLONNES LUMINEUSES VERTICALES.

Bravais ⁽¹⁾ les attribue à la réflexion de la lumière sur des faces qui oscillent autour de la position horizontale. D'après les idées que l'on avait sur l'orientation des cristaux de glace, ces faces réfléchissantes ne pouvaient être que les bases des prismes allongés. Bravais, jugeant trop exiguës les bases des prismes hexagonaux ordinaires, considérait les prismes terminés à leurs extrémités par des lamelles comme plus propres à produire ces phénomènes. Mais nous savons maintenant que les prismes plats et les étoiles s'orientent horizontalement. Vu la fréquence des formes lamellaires de la glace, la difficulté est maintenant de comprendre pourquoi l'on ne voit pas plus souvent des colonnes lumineuses.

Lorsque le Soleil est au-dessus de l'horizon, il est nécessaire d'admettre au moins deux réflexions successives. Pour qu'elles soient efficaces, peut-être faut-il que les lamelles soient très rapprochées les unes des autres dans le nuage.

(¹) *Journal de l'École polytechnique*, 31^e cahier, p. 165.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Le présent Travail a pour base principale dix années d'observations systématiques sur les halos. Pour arriver à bien comprendre ces phénomènes, il faut les bien connaître et pour les bien connaître il faut beaucoup de temps car plusieurs d'entre eux sont fort rares et la plupart ne font que de courtes apparitions.

L'étude statistique de ces dix années d'observations m'a conduit à un certain nombre de résultats dont les principaux sont les suivants :

Halo de 22°. — Sa fréquence réelle, comme celle des cirrus, est fonction de la nébulosité inférieure.

Elle a une variation annuelle et une variation diurne que j'ai calculées.

Elle ne dépend pas seulement de la fréquence des nuages glacés mais aussi et surtout de la tendance, variable suivant l'heure et la saison, que manifestent ces nuages à donner le halo.

Arcs tangents. — Leur cause productrice a réellement une variation annuelle, contrairement à ce qu'avait avancé Renou.

J'ai envisagé séparément deux de ces phénomènes, correspondant aux deux formes principales des cristaux de glace atmosphériques. Pour chacun d'eux, j'ai dégagé, des causes perturbatrices qui les dissimulent, la variation annuelle, la variation diurne et la variation avec la hauteur du Soleil.

Sur l'orientation que prennent les cristaux de glace pendant leur chute on n'avait que des idées *a priori*, sans fondement vraiment scientifique et, de fait, inexactes. J'ai déterminé expérimentalement cette orientation pour de petits corps solides réalisant les diverses formes cristallines de la glace.

1° Dans les liquides non visqueux ;

2° Dans les liquides visqueux.

J'ai reconnu qu'elle est la même dans l'air que dans l'eau, du moins tant que les corps tombent avec une certaine vitesse et cer-

tains faits prouvent que tel est le cas pour les cristaux de glace orientés qui donnent les halos.

Muni des données tant météorologiques que physiques ainsi recueillies, et en possession, d'autre part, de nombreuses mesures angulaires sur les halos, j'ai procédé ensuite à un examen critique de la théorie de ces phénomènes.

L'étude de l'arc circumzénithal, en raison du problème intéressant qu'elle soulève, m'a paru mériter des développements particulièrement étendus. Pour cet arc, ainsi que pour les autres courbes lumineuses tangentes au halo de $46''$, je conclus en faveur de la théorie de Bravais, contestée récemment par Pernter.

Par contre, pour l'anthélie, les paranthélies et les deux halos blancs, je propose une explication nouvelle.

En terminant, j'adresse à M. Dutheil l'expression bien sincère de ma reconnaissance pour sa collaboration constante et dévouée. La partie la plus importante de ce Travail, celle, en tous cas, dont l'intérêt sera le plus durable et qu'il serait le plus difficile de refaire, c'est notre série de dix années d'observations vigilantes et ininterrompues et c'est autant son œuvre que la mienne.

Je tiens aussi à remercier M. Jaubert, Chef du Service physique et météorologique de l'Observatoire de Montsouris, qui, dans le cours de mes recherches, ne m'a jamais ménagé ni les facilités matérielles, ni les encouragements.

Vu et approuvé :

Paris, le 26 décembre 1908.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,
PAUL APPELL.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 26 décembre 1908.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,
L. LIARD.



SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

1^o Détermination des poids moléculaires par la méthode des densités de vapeur.

3^o Météorites.

Vu et approuvé :

Paris, le 26 décembre 1908.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 26 décembre 1908.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS.

4287. Quai des Grands-Augustins, 55.
